

Revista trimestral

TECNOLOGÍA

en marcha

ISSN 0379-3982 Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014

Contenido

Objective C: Análisis de los métodos de comunicación de eventos entre objetos Objective C: Object event communication methods analysis <i>Óscar Viquez A., Luis Alonso Vega B.</i>	3
Diseño analógico de un estimador de parámetros dependientes de la temperatura de los generadores fotovoltaicos Analog design of an estimator of temperature dependent parameters of photovoltaic generators <i>Stephanie Barrantes Pacheco</i>	12
Modelado y simulación del comportamiento real de los componentes pasivos en el dominio de la frecuencia Passive component's real behavior models and simulation for the frequency domain <i>Luis Arturo Herrera-Vega, Arys Carrasquilla-Batista</i>	21
Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero Concepts and implementation of PID controllers in a smelting furnace steel <i>Pablo Javier Jiménez-Ceciliano</i>	29
Rol de la Tropomiosina y del Adaptador Nedd9 durante la invasión celular de <i>Listeria Mnocytogenes</i> Tropomyosin and NEDD9 adapter roll to cell invasion by <i>L. monocytogenes</i> <i>Núñez-Montero, Andreas Kühbacher, Johnny Peraza, Pascale Cossart, Javier Pizarro-Cerdá</i>	39

Efecto de la calidad espectral sobre el desarrollo vegetal de <i>Salvia splendens</i> variedad Vista Red and White Effect of spectral quality on plant development of <i>Salvia splendens</i> variety Vista Red and White <i>Federico José Gómez-Coto</i>	47
Muestreo comprimido en red inalámbrica de sensores para monitorización de vibración en puentes Compressed Sensing in Vibration Monitoring Wireless Sensor Network <i>Oswaldo Casares Quirós</i>	53
Desarrollo de una metodología de optimización y fijación de precios de exportación de Madera Dura de Estados Unidos a Europa y Asia Development of a methodology of optimization and fixing prices of Hardwood Exports from U.S. to Europe and Asia <i>Diana Brenes-Ramírez</i>	62

Presentación

Programa de Pasantías para la Movilidad Estudiantil con Fondos del Sistema CONARE

En el año 2012 los cuatro rectores de universidades públicas que conforman CONARE acordaron crear un programa de becas de movilidad internacional estudiantil creando un fondo de \$400,000 con recursos del sistema CONARE. En el caso del TEC este fondo se transformó en el “Programa de Pasantías Estudiantil, Fondos del Sistema CONARE-TEC” y es gestionado desde la rectoría. El programa promueve la movilidad de estudiantes de todas las escuelas y sedes del TEC con estudiantes que califican ya a su tesis o práctica de especialidad y tiene el objetivo de fomentar el espíritu académico-científico de los participantes.

Cada participante de este programa es seleccionado por su escuela con un mentor, y debe visitar un centro de investigación, empresa o universidad en cualquier país del mundo excepto América Central y el Caribe. Los programas académicos que reciben más de una pasantía deben seleccionar países que no hablen español. La pasantía cubre todos los gastos por al menos 3 semanas, pero cada participante o programa puede extender la pasantía con fondos adicionales. El objetivo es que el pasante en esta visita pueda reforzar el área de conocimiento que requiere para el desarrollo de sus tesis u practica de especialidad.



Un requerimiento especial es que el pasante se compromete a publicar un artículo académico en cualquiera de las revistas del TEC.

Para la primera promoción del programa 2013 participaron un total de 34 estudiantes y hasta la fecha todos ha logrado someter sus artículos académicos en alguna revista del TEC. Varios han publicado sus artículos con co-autoría de investigadores de los sitios visitados, han establecido conexiones para becas de maestría y han logrado

ampliar la visión y amplitud de los proyectos de investigación o vinculación de sus escuelas.

El Programa de Pasantías felicita a todos los pasantes y sus asesores por el éxito logrado. La Revista Tecnología en Marcha se siente complacida de apoyar estas dos ediciones dado que fomenta la excelencia académica del TEC fomentando así la vocación científica y el espíritu emprendedor de los estudiantes.



Julio César Calvo-Alvarado, Ph.D.

Rector. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Objective C: Análisis de los métodos de comunicación de eventos entre objetos

Objective C: Object event communication methods analysis

Óscar Víquez-Acuña¹
Luis Alonso Vega-Brenes²

Fecha de recepción: 19 de mayo del 2014
Fecha de aprobación: 27 de julio del 2014

Víquez-Acuña, O; Vega-Brenes, L. A. Objective C: Análisis de los métodos de comunicación de eventos entre objetos. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 5-13

- 1 Profesor. Carrera de Ingeniería en Computación, sede San Carlos. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: oviquez@itcr.ac.cr
- 2 Estudiante. Carrera de Ingeniería en Computación, sede San Carlos. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: lavb91@gmail.com

Palabras clave

Objective C; Desarrollo iOS; Modelo Vista Controlador; Delegados; Notificaciones; Bloques de finalización; Observación; Comunicación de controladores.

Resumen

Este artículo muestra una serie de patrones de programación utilizados para la comunicación de eventos en el lenguaje Objective C. Cada uno de estos patrones es explicado según su funcionalidad, se da un ejemplo conciso de su uso en el desarrollo de software cotidiano y se presenta un listado de ventajas y desventajas con respecto a las características propias del lenguaje.

Al iniciar se retoman algunos conceptos de la programación orientada a objetos, para no perder de vista el tema con el que se está lidiando. Iniciando por algunos de los pilares de la orientación a objetos, se recuerda que se busca tener en mayor o menor medida en el software para que este sea considerado de calidad. Luego se analiza el patrón de modelo vista controlador, muy popular en los últimos años y el cual permite aplicar, como se verá después, los otros patrones de comunicación de eventos.

Los patrones tratados son: delegados, notificaciones, observación y bloques de finalización, por lo que a lo largo de este artículo se discutirá parte de sus usos cotidianos así como sus puntos a favor y contras. El objetivo de este análisis es brindar a cualquier desarrollador un punto de discusión al seleccionar alguno de estos métodos para el desarrollo de una tarea específica.

Keywords

Objective C; iOS Development; Model View Controller; Delegates; Notifications; Completion Blocks; Observation; Controller communication.

Abstract

This article shows a series of programming patterns used in event communication in Objective C. Each one of these patterns is explained according to its functionality, a concise example of its day to day use is given and, optionally, a listing of its advantages and disadvantages regarding its own features is presented.

In the beginning, some object oriented programming concepts are retaken, so that we don't lose sight of the topic we're dealing with. Starting with some of the object orientation pillars, we remember what we seek to have in a greater or minor extent in the software for it to be considered of good quality. Then the model view controller pattern is analyzed, which has been very popular in the last years, and which allows to apply, as it will be shown later, the other event communication patterns.

Mentioned patterns are: delegates, notifications, observation and completion blocks. Each one of these communication methods have its own pros and cons. Throughout this article their everyday uses will be discussed. The objective of this analysis is to offer any developer a discussion point when selecting one of these methods for a specific task.

Introducción

En la programación orientada a objetos, dos de los grandes pilares son la abstracción y el encapsulamiento. Ambos conceptos se aplican para reducir un concepto a una clase definida y discreta, que a la vez muestra únicamente una parte de su composición al resto del sistema. Este comportamiento garantiza una mayor estabilidad y seguridad interna del objeto, pues las interacciones con el mundo externo se mantienen bajo control propio.

Por otro lado, pero en el mismo tema, se encuentra el concepto de cohesión y de acoplamiento. Se considera que ambos deberían tener un nivel muy bajo en todo sistema. Como referencia, la métrica de cohesión está representada con la fórmula relacional siguiente:

Donde H es el nivel de cohesión, dado R como el número de relaciones internas al ensamblado y N el número de tipos o clases del mismo (Smacchia, Metrics Definition, 2004).

El patrón Modelo Vista Controlador

En el lenguaje Objective C, y sobre todo en el desarrollo de aplicaciones móviles, el patrón de diseño Modelo Vista Controlador es utilizado de forma casi obligatoria, según las normas que dicta Apple sobre sus herramientas y kit de desarrollo (Apple, 2012). Las aplicaciones móviles se componen de una o varias vistas, las cuales realizan interacciones

con el usuario, ya sea para obtener datos o para mostrarlos.

El conjunto de clases diseñadas únicamente para contener o procesar datos es conocido como el Modelo. Las clases que procesan las señales de entrada provenientes del usuario, tales como un toque en la pantalla o el movimiento del dispositivo, y a la vez otros eventos del modelo de datos, son conocidas como Controladores. Finalmente, en el caso especial del desarrollo en iOS, la Vista se conforma de archivos especiales conocidos con Nibs (extensión .xib) o Storyboards, básicamente guiones gráficos que describen cada vista y su relación con otras. Dichos archivos contienen una estructura XML especial para definir interfaces gráficas conformadas por los controles nativos de la plataforma y la especificación de cada relación, incluyendo enlaces a otra vista, salidas o conexiones de controles y acciones hacia el controlador.

Comunicación entre objetos

En el ambiente de desarrollo de iOS, se pueden encontrar algunos patrones de comunicación entre objetos que tienen como responsabilidad enviar o responder a señales, mensajes o interacciones (Ganem, 2013). El objetivo principal del presente artículo es brindar un análisis sobre cada uno de estos métodos, para obtener una idea más clara de los pros y contras de cada uno, así como sugerencias acerca de en qué contextos deberían ser preferiblemente utilizados cada uno (Hocking, 2011).

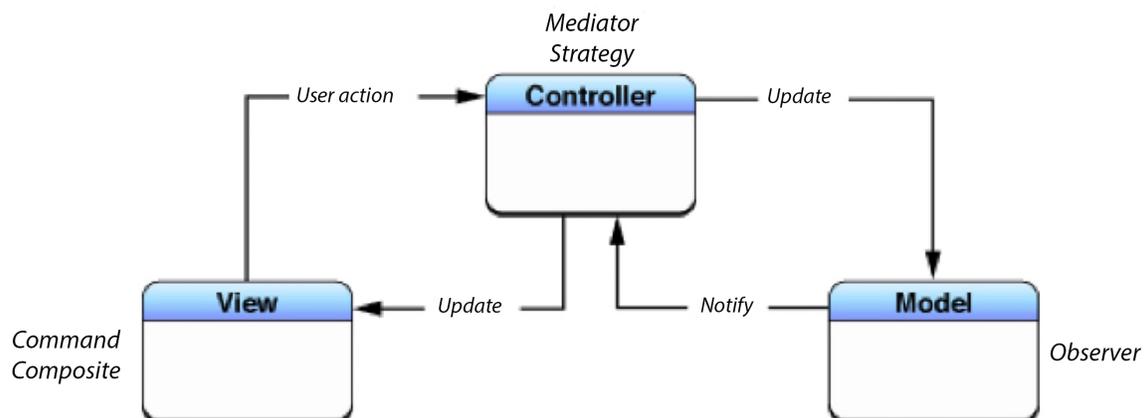


Figura 1 Diagrama Modelo-Vista-Controlador: Fuente: Apple, 2012.

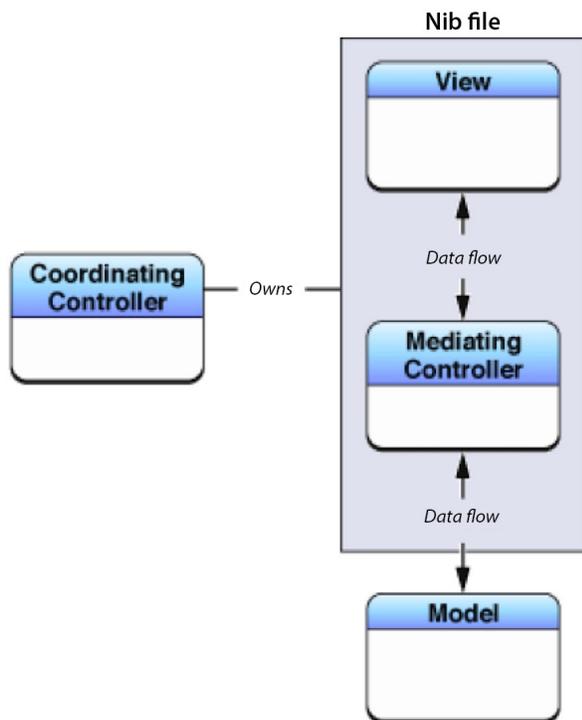


Figura 2 Coordinación de controlador como dueño de un xib. Fuente: Apple, 2012.

Los métodos principales son los siguientes:

- Delegados
- Notificaciones
- Observación
- Bloques de finalización

Delegados

Para el tema de comunicación, delegados y protocolos van de la mano. Los protocolos son lo que en otros lenguajes de programación se entenderían como interfaces. Poseen una declaración de métodos o mensajes que deben ser implementados ya sea obligatoria u opcionalmente por un objeto. La facilidad que proporcionan los delegados es simple: para un objeto poder comunicar algo a otro, no debe conocer la clase del primero, solo le basta saber que es un delegado de un determinado protocolo. Esto le asegura al emisor que el otro objeto sabe cómo reaccionar ante dicho mensaje.

Dentro del mismo marco de desarrollo de iOS, se observa que este patrón de programación es muy

utilizado, sobre todo en objetos gráficos como controles, en los que resulta útil permitir al desarrollador que seleccione qué controlador u objeto desea que reciba los mensajes de eventos en dicho control. Por ejemplo, un caso típico es usar un control de vista de tabla. En esta situación es normal que sea necesario saber cuándo se selecciona una de las filas de la tabla, y generalmente es el mismo controlador de la vista el que asume la responsabilidad de decidir qué ocurre (navegar a otra vista, mostrar un menú, etc.).

Las fuentes de datos son patrones similares, pero la función principal de estas es indicar al emisor cierta información. Siguiendo el ejemplo de la vista de tabla, para los casos en que estas no son estáticas, es necesario declarar un controlador que determine sus datos. Nuevamente, es común que dicha fuente de datos sea el mismo controlador de la vista, sin embargo puede ser cualquier otro objeto que cumpla con el protocolo correspondiente (determinar la cantidad de secciones, la cantidad de filas por sección, etc.).

Entre algunas de las ventajas de este patrón se encuentran:

- El delegado puede ser de cualquier tipo, siempre y cuando cumpla con lo especificado por el protocolo.
- Sintaxis de programación estricta. Las llamadas son mensajes comunes, claramente definidas en el protocolo, por lo que los parámetros tienen un tipo fuertemente definido.
- Errores o advertencias en tiempo de compilación si algún método no está implementado de la manera correcta.
- El flujo de la comunicación es fácil de rastrear pues las llamadas son sincrónicas.
- Un mismo controlador puede implementar varios protocolos, con distintos delegados cada uno.

La comunicación puede ser bilateral, pues una llamada a un método del protocolo puede opcionalmente devolver un valor (como ocurre con las fuentes de datos).

Por otro lado, algunas de las desventajas que presentan los delegados son:

- Su declaración puede ser algo extensa a nivel de líneas de código, pues requieren la declaración

```

- (NSInteger)numberOfSectionsInTableView:(UITableView *)tableView
{
    return 1;
}

- (NSInteger)tableView:(UITableView *)tableView numberOfRowsInSection:(NSInteger)section {
    return [elements count];
}

- (UITableViewCell *)tableView:(UITableView *)tableView
    cellForRowAtIndexPath:(NSIndexPath *)indexPath
{
    static NSString *MyIdentifier = @"MyIdentifier";

    UITableViewCell *cell = [tableView dequeueReusableCellWithIdentifier:MyIdentifier];

    if (cell == nil)

```

Figura 3 Uso de delegado en vista de tabla

del protocolo. Es recomendado que esta declaración se haga en un archivo independiente. También requiere declarar la propiedad del delegado, y la implementación del protocolo en el delegado mismo.

- Requiere establecer el delegado en nulo al remover de memoria el controlador. No hacer esto puede causar un error grave de memoria en tiempo de ejecución debido a llamadas a un objeto no asignado.
- Tener varios delegados para un mismo evento requiere de una implementación difícil de mantener, pues básicamente necesitaría hacer la llamada a cada uno. Este patrón está diseñado para tener únicamente un receptor.

Notificaciones

En iOS existe un concepto de centro de notificaciones. Básicamente es una variable "singleton" que se encarga de recibir publicaciones de mensajes (eventos) y registrar observadores para estos mensajes. Entre las características de este patrón se encuentran el hecho de requerir un nivel de acoplamiento muy bajo, el uso de llaves de notificación, las cuales son cadenas de caracteres, y la capacidad de que cualquier objeto pueda recibir las notificaciones.

Un ejemplo del uso de este patrón es al crear aplicaciones que hacen constantemente llamadas a un API en un sitio web. Es posible que varios componentes requieran conocer el momento en que se recibieron nuevos datos. Para esto, cada uno de esos componentes debe registrarse como observador de la notificación, y el controlador encargado de recibir los datos debe publicar la notificación utilizando la llave indicada.

Otra característica de este tipo de comunicación es que el único mensaje que se puede enviar a los observadores es un objeto de clase diccionario, por lo que tanto emisor como receptores deben conocer la estructura exacta del contenido de ese objeto.

Algunas ventajas de las notificaciones son las que siguen:

- Fácil de implementar, no requiere muchas líneas de código.
- Pueden haber varios objetos receptores de una misma notificación.
- Se puede enviar datos a los receptores utilizando un objeto diccionario.

Por otro lado, algunas desventajas son:

- En tiempo de compilación es imposible asegurarse de que las notificaciones sean manejadas correctamente por los observadores.

```
[[NSNotificationCenter defaultCenter] addObserver:self
 selector:@selector(receiveTestNotification:)
 name:@"TestNotification"
 object:nil];

return self;
}

- (void) receiveTestNotification:(NSNotification *) notification
{

if ([[notification name] isEqualToString:@"TestNotification"])
    NSLog(@"Successfully received the test notification!");
}
```

Figura 4 Ejemplo de uso de notificaciones

- Se necesita eliminar el observador al desasignar el objeto, de otra forma podrían ocurrir errores de memoria.
- No es muy rastreable. La ejecución de los observadores es más compleja y depurar este tipo de mensajes requiere más trabajo.
- El nombre de la notificación (llave) y del diccionario enviado debe ser conocido por ambas partes.
- No hay forma de que quien publica la notificación reciba algún dato de vuelta. Y de cualquier manera sería muy complejo procesar alguna posible respuesta debido a que puede haber más de un observador que atiende el evento.
- Provee una forma de responder a cambios de estados de objetos que no fueron creados por uno mismo, y cuya implementación no puede ser modificada (por ejemplo, en el SDK).
- Puede mostrar el valor anterior y el nuevo de la propiedad que se está observando.
- Se pueden indicar propiedades anidadas.
- Abstracción completa sobre el objeto observado, pues no se necesita agregar ningún código extra.

También se tienen algunas desventajas, como las siguientes:

Observación

Por sus siglas en inglés, KVO, la observación de llave-valor es un patrón que consiste en observar el valor de la propiedad de algún objeto para saber cuándo esta cambia. A diferencia de los dos patrones anteriores, delegación y notificaciones, la observación es más útil aplicada en objetos más que en controladores (Thompson, 2013). Solamente es utilizado en propiedades y no puede ser usado en métodos.

Algunas ventajas de este patrón involucran:

- Permite una forma sencilla de proveer sincronía entre dos objetos. Un caso práctico de esto podría ser la relación entre un modelo y una vista.
- Las propiedades observadas se definen utilizando cadenas de caracteres, lo que podría no permite recibir advertencias o errores en tiempo de compilación. Sin embargo hay formas de arreglar esta situación con un poco de código extra, utilizando un selector de método y convirtiéndolo a cadena (Thompson, 2013).
- La refactorización de código puede producir que este patrón deje de funcionar (al alterar los nombres de propiedades).
- Debido a que la observación se realiza utilizando un solo método, el código puede resultar en una gran cantidad de condicionales anidados en caso de observar varias propiedades.
- Se necesita eliminar el observador al desasignar el objeto.

Bloques de finalización

Este último patrón consiste en bloques enviados en línea como parámetro de un método. Los bloques de código son una característica que fue agregada a C, Objective C y C++. Estos son lo que en otros lenguajes de programación se conocerían como lambdas, y representan código ejecutable que puede ser guardado en variables o pasado como parámetro, y que a la vez puede retornar datos.

Este tipo de patrón se puede ver a menudo en eventos que pueden tomar algún tiempo, o en llamadas asíncronas. Un ejemplo puede ser las animaciones en iOS, las cuales por lo general poseen un parámetro donde se indican los cambios en una vista (la cual se animará), como se muestra en la figura 5, o incluso un bloque de finalización que se ejecuta cuando la animación ha terminado.

Como segundo ejemplo se puede mencionar las llamadas asíncronas a servicios web, que pueden ejecutar un bloque de finalización en caso de recibir correctamente datos, y otro en caso de haber algún error. Este ejemplo muestra cómo este patrón podría sustituir a un delegado.

Algunas ventajas de este patrón son:

- Permiten indicar una manera flexible de establecer una respuesta ante un evento.
- Este patrón permite enviar parámetros y obtener datos de vuelta con clases estrictamente definidas.
- No requieren de código extra para ser definidos, únicamente de que un parámetro sea de tipo bloque.

```
UIView* view = [self.view viewWithTag:100];
[UIView animateWithDuration:0.5
                    delay:0.1
                    options: UIViewAnimationCurveEaseOut
                    animations:^
    {
        CGRect frame = view.frame;
        frame.origin.y = 0;
        frame.origin.x = (-100);
        view.frame = frame;
    }
                    completion:^(BOOL finished)
    {
        NSLog(@"Completed");
    }
];
```

Figura 5 Ejemplo de bloque de completación en animaciones de vistas

```
NSURLRequest *request = [NSURLRequest requestWithURL:URL];
NSURLSessionDataTask *dataTask = [manager dataTaskWithRequest:request
                                completionHandler:^(NSURLResponse *response, id responseObject, NSError *error) {
    if (error) {
        NSLog(@"error!");
    } else {
        NSLog(@"task successful!");
    }
}];
[dataTask resume];
```

Figura 6 Ejemplo de bloque de finalización en llamada asíncrona

Por otro lado, algunas desventajas son las siguientes:

- Pueden crear una alta cohesión al ser usados.
- No tienen un alcance global.

Experiencias de desarrollo

Durante el tiempo la practican se estuvo siempre en el ámbito de desarrollo para iOS, y desde entonces también se ha seguido dedicando mayormente a esta plataforma de desarrollo.

En todo este tiempo se logró aprender, evaluar y utilizar distintos modelos o patrones de desarrollo, ya sea a gran escala o en extractos específicos de una tarea. Para dar algunos ejemplos:

El uso de delegación es ampliamente visto en cualquier proyecto, ya sea al utilizar componentes propios de la plataforma, y al crear uno mismo sus propias clases y objetos. Este patrón permite definir una estructura, pero sobre todo, un comportamiento. Las notificaciones funcionan muy bien para dar a conocer eventos en un rango más grande de emisión y con más posibles receptores, como al necesitar dar a conocer a varios componentes de que hay nuevos datos por mostrar, procesar, etc. Los bloques de finalización funcionan muy bien para dar opción al desarrollador de ejecutar algo luego de una llamada asíncrona, y la observación es perfecta para estar al tanto del estado de un objeto y responder ante cualquier cambio de este.

En uno de los proyectos que se ha tenido que trabajar, se utilizó hasta tres de estos patrones juntos. La descripción del funcionamiento es la siguiente:

Una aplicación móvil requiere hacer llamadas a un servicio web constantemente para revisar si existen nuevos datos disponibles y procesarlos, o para ejecutar una acción como publicar un mensaje. La llamada al servicio se hace utilizando un método propio del marco de desarrollo de iOS, el cual acepta como parámetro un bloque de finalización. Se garantiza que este código será ejecutado únicamente cuando los resultados hayan llegado. Estos datos se procesan para ver si la llamada se hizo correctamente o si hubo algún error. Dependiendo del resultado de este proceso, se indica al delegado de la clase que se encargó de traer los datos. Este último procesará nuevamente el resultado para realizar los cambios correspondientes en un nivel más

alto de abstracción y al final emitirá una notificación para que cualquier controlador que requiera dichos datos sepa que hay nueva información disponible, que alguna acción se ejecutó correctamente o que hubo un fallo al ejecutarla. A continuación, los controles se encargan independientemente de mostrar los nuevos datos o el resultado de la acción a nivel de vista.

Conclusiones

En el caso de los patrones de programación generalmente no existe un favorito, y la decisión sobre qué metodología usar proviene siempre del contexto y de las necesidades específicas presentes en el diseño de la aplicación. También es importante rescatar que estos patrones pueden ser usados en conjunto, y no necesariamente hay que elegir uno.

Otra consideración que se debe tener en la producción de software es seguir la guía de estándares y buenas prácticas. En el caso de estos patrones, es fácil localizar dicha información en el portal de desarrolladores de Apple.

Referencias

- Apple. (13 de Diciembre de 2012). *Coordinating Efforts Between View Controllers*. Obtenido de iOS Developer Library: <https://developer.apple.com/library/ios/featuredarticles/ViewControllerPGforiPhoneOS/ManagingDataFlowBetweenViewControllers/ManagingDataFlowBetweenViewControllers.html>
- Apple. (17 de Julio de 2012). *KVO Compliance*. Obtenido de iOS Developer Library: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/Cocoa/Conceptual/KeyValueObserving/Articles/KVOCompliance.html>
- Apple. (9 de Enero de 2012). *Model-View-Controller*. Obtenido de iOS Developer Library: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/general/conceptual/CocoaEncyclopedia/Model-View-Controller/Model-View-Controller.html>
- Apple. (13 de Diciembre de 2012). *Working with Blocks*. Obtenido de iOS Developer Library: <https://developer.apple.com/library/ios/documentation/Cocoa/Conceptual/ProgrammingWithObjectiveC/WorkingwithBlocks/WorkingwithBlocks.html>
- Ganem, E. (4 de Setiembre de 2013). *iOS Design Patterns*. Obtenido de RayWenderlich: <http://www.raywenderlich.com/46988/ios-design-patterns>
- Hocking, C. (14 de Junio de 2011). *When to use Delegation, Notification, or Observation in iOS*. Obtenido de Shine Technologies: <http://blog.shinotech.com/2011/06/14/delegation-notification-and-observation/>

Smacchia, P. (2004). *Metrics Definition*. Retrieved from ndepend:
<http://www.ndepend.com/Metrics.aspx#RelationalCohesion>

Smacchia, P. (15 de Febrero de 2008). *Code metrics on Coupling, Dead Code, Design flaws and Re-engineering*.
Obtenido de CodeBetter: <http://codebetter.com/patricks->

[macchia/2008/02/15/code-metrics-on-coupling-dead-code-design-flaws-and-re-engineering/](http://codebetter.com/patricks-macchia/2008/02/15/code-metrics-on-coupling-dead-code-design-flaws-and-re-engineering/)

Thompson, M. (7 de Octubre de 2013). *Key-Value Observing*.
Obtenido de NSHipster: <http://nshipster.com/key-value-observing/>

Diseño analógico de un estimador de parámetros dependientes de la temperatura de los generadores fotovoltaicos

Analog design of an estimator of temperature dependent parameters of photovoltaic generators

Stephanie Barrantes-Pacheco.¹

Fecha de recepción: 28 de abril del 2014

Fecha de aprobación: 18 de agosto del 2014

Barrantes-Pacheco, S. Diseño analógico de un estimador de parámetros dependientes de la temperatura de los generadores fotovoltaicos. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 14-22

¹ Estudiantes de ingeniería electrónica. Teléfono: (506)88166421. Correo electrónico: stephanieb46@hotmail.com. San José, Costa Rica. San Francisco de Dos Ríos. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Palabras claves

Amplificadores operacionales; energía fotovoltaica; estimador; generadores fotovoltaicos.

Resumen

Este trabajo consiste en el diseño de un circuito analógico capaz de funcionar como un estimador gradiente para convertidores de energía fotovoltaica. Esto, con el fin de realizar una parte del proceso que se necesita para la conversión de energía fotovoltaica en energía eléctrica. El objetivo principal de este estimador es obtener dos parámetros desconocidos los cuales dependen de la temperatura y la manufactura del panel fotovoltaico que se pretende utilizar. Este diseño de estimador no funciona para todos los generadores fotovoltaicos, pero sí para la mayoría de ellos ya que la propuesta abarca las tecnologías más comunes de generadores que se utilizan actualmente. El documento se divide básicamente en tres partes. Primero se explica un poco la parte teórica y la propuesta en la cual está basado el diseño de este circuito. Luego, con diagramas de bloques se ilustra el funcionamiento que debe tener el circuito propuesto en sus distintas etapas y, por último, se explican las configuraciones analógicas de los circuitos que se encargan de resolver cada uno de los bloques. La unión final de estas configuraciones cumple con el objetivo de obtener los dos parámetros desconocidos.

Keywords

Estimator; operational amplifiers; photovoltaic energy; photovoltaic generators.

Abstract

This work involves the design of an analog circuit operable as a gradient estimator for photovoltaic (PV) inverters. This is for a part of the process for the conversion of photovoltaic energy into electrical energy. The main objective of the estimator is to obtain two unknown parameters which depend on the temperature and the PV panel manufacturing intended to be used. This estimator design do not works for all PV generators, but for most of them, because the proposal covers the most common technologies currently used generators. The paper is basically divided in three parts. First, an explication of the theory and the proposal which is based on the design of this circuit is explained. Then, with block diagrams are illustrated the operation that should be in the different stages of the circuit, and finally the analog circuit configurations that are responsible for resolving each of the blocks that are explained. The final combination of these configurations accomplishes the goal of obtaining the two unknown parameters.

Introducción

La energía fotovoltaica es un tema en el que se ha invertido bastante investigación últimamente debido a que se trata de una energía que posee muchas ventajas. Existen distintos tipos de generadores fotovoltaicos; sin importar el tipo de generador que se utilice el proceso para la conversión completa de la energía se divide en dos partes: primero la radiación solar en energía, y luego esta en niveles de corriente y voltaje. Este trabajo se enfoca en la segunda parte del proceso. Para esto requiere tomar en cuenta alguna información relevante en el tema.

Conversión de energía fotovoltaica y generadores fotovoltaicos

La energía fotovoltaica es un tema en el que se ha invertido bastante investigación últimamente debido a que se trata de una energía que posee muchas ventajas.

Los generadores fotovoltaicos tienen la relación generalizada entre corriente y tensión dada por (1), donde $\Delta(\cdot)$ y $\varphi(\cdot)$ son funciones que varían según la tecnología del generador de voltaje. S es la incidencia de la radiación solar, T la temperatura del generador y $\rho(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n)$ es un conjunto de

parámetros que dependen del material y la manufactura de los distintos generadores fotovoltaicos.

$$I_{pv} = \Delta(S, i, T, p) - \phi(S, T, v_{pv}, p) \quad (1)$$

En esta ecuación es importante destacar tres características de ella. La primera es que $\varphi(\cdot)$ es estrictamente creciente, la segunda que $i_{pv}(v_{pv})$ es biyectiva con respecto a v , y por último $\Delta(\cdot)$ es mayor o a lo sumo igual que $\varphi(\cdot)$. Estas características son fundamentales para la ejecución del estimador. Esta ecuación es de suma importancia para poder operar el generador en el punto de máxima potencia.

Algunos de los parámetros ρ que dependen de la temperatura propiamente del generador no se pueden calcular o medir de manera directa por lo que se requiere la estimación de algunos de estos. Por esto, se genera la necesidad de adquirir algún medio que pueda obtener los parámetros deseados. Para obtener estos parámetros se diseñó el estimador propuesto por Carlos Meza y Romeo Ortega.

Se tiene un principal supuesto, se trabaja en condiciones ambientales uniformes. A esto se refiere que se tiene la misma radiación solar y la misma temperatura en cada celda. El estimador podrá ser utilizado para la mayoría de generadores fotovoltaicos ya que la propuesta abarca las tecnologías más comunes de generadores que se utilizan. Cada tecnología varía según el material que se utilice y el proceso de manufactura.

Como se mencionó antes, este trabajo se enfoca en la segunda conversión del proceso, donde se deben estimar el valor desconocido de algunos parámetros. Para esto es que se diseña el estimador, donde se toma la corriente y voltaje provenientes del panel solar como entradas del circuito encargado de estimar los parámetros.

Los valores que se pretenden estimar son de gran importancia para lograr que el generador fotovoltaico opere en su punto de máxima potencia, para así aprovechar al máximo la energía. Por otra parte, estos parámetros son necesarios para algunas estructuras de control que utilizan el modelo eléctrico no lineal de los paneles fotovoltaicos.

Existe un estudio y una propuesta teórica para la creación del estimador que cumple con el objetivo deseado. Este proyecto se tomó como base para

continuar con el diseño analógico del estimador descrito.

Estimador de parámetros de generadores fotovoltaicos propuesto

El estimador propuesto está basado en un modelo simple de generadores fotovoltaicos, no funciona para todas las tecnologías existentes, pero sí para muchas de ellas. El modelo para el cual funciona este estimador está basado en 4 supuestos sobre la ecuación (1). La primera es que $\Delta(\cdot)$ está definida por:

$$\Delta(\cdot) = p_1 S$$

donde ρ_1 es un parámetros constante positivo, que depende del material y el proceso de manufactura del generador fotovoltaico y S la radiación solar como se dijo anteriormente. La segunda es que $\varphi(\cdot)$ está dada por:

$$\phi(\cdot) = p_2(T) \exp(p_3(T) v_{pv})$$

donde $\rho_2(T)$ y $\rho_3(T)$ son parámetros positivos que dependen también del material y el proceso de manufactura pero, también, de la temperatura del generador fotovoltaico. La tercera es que $\rho_1 \gg \rho_2$. Por último, se tiene que el generador fotovoltaico no tiene pérdidas resistivas. Con esto se tiene la ecuación (1) reescrita como se muestra en (2).

$$i_{pv}(v_{pv}) = p_1 S - p_2 \exp(p_3 v_{pv}) \quad (2)$$

Algunos datos importantes sobre distintos parámetros que se involucran en el problema son los siguientes. Los parámetros ρ_2 y ρ_3 deben ser estimados debido a que la temperatura del generador no se mide y estos dependen de este factor. La radiación solar y ρ_1 son conocidos, como se explicará más adelante, y por último v_{pv}, i_{pv} se obtienen por medición.

Para la obtención del parámetro ρ_1 se realiza un pequeño experimento con el panel fotovoltaico que se pretende utilizar. Se obtiene la gráfica de radiación solar contra la corriente del panel en corto circuito, con variaciones de la radiación. Con esto se obtiene una recta de la cual se calcula la pendiente y este es el valor del parámetro ρ_1 . Para obtener v_{pv}, i_{pv} se mide la tensión y corriente de la celda o el panel fotovoltaico.

Para los parámetros ρ_2 y ρ_3 se realiza la estimación de este trabajo, debido a que los valores que interesan son los de los parámetros y no la temperatura del generador propiamente. Además, realizar el proceso similar para la obtención de ρ_1 es más complicado y de mayor duración que la estimación de los parámetros.

Meza y Ortega señalan en su documento (2) como:

$$y = \theta^T \Phi \quad (3)$$

donde se tiene que:

$$\begin{aligned} \Phi &= [v_{pv} \mathbf{1}]^T \\ y &= \ln(Sp_1 - i_{pv}) \\ \theta &= [\theta_1 \theta_2]^T \end{aligned}$$

y θ_1 y θ_2 representan los parámetros que se quieren estimar,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= p_3 \\ \theta_2 &= \ln(p_2) \end{aligned}$$

También definen $\hat{\theta} = [\hat{\theta}_1 \hat{\theta}_2]^T$ como los valores estimados de θ , y con esto definen el estimador como se muestra en (4).

$$\hat{\theta} = \Gamma \Phi (y - \Phi^T \hat{\theta}) \quad (4)$$

Se tiene que Γ es una matriz positiva definida por:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix}$$

donde cada uno de estos factores se elige de manera adecuada para afinar las dinámicas del estimador.

Propuesta de circuito para estimar los parámetros deseados

Para la estimación de los parámetros del generador fotovoltaico se propone un circuito analógico conformado por amplificadores operacionales, resistencias, capacitores, diodos y de ser necesario algún circuito integrado que se encargue de alguna operación en específico.

De la ecuación (4), denominando $v_{pv} = w$ se obtienen (5) y (6), las cuales representan la ecuación principal del estimador para obtener los parámetros deseados.

$$\hat{\theta}_1 = (\gamma_{11}w + \gamma_{12})(\gamma - \hat{\gamma}) \quad (5)$$

$$\hat{\theta}_2 = (\gamma_{21}w + \gamma_{22})(\gamma - \hat{\gamma}) \quad (6)$$

donde

$$\hat{\gamma} = \hat{\theta}_1 w + \hat{\theta}_2$$

Las ecuaciones (5) y (6) se pueden reescribir como se muestra en (7) y (8) respectivamente.

$$\hat{\theta}_1 = \gamma_{11}(wy - w^2\hat{\theta}_1 - w\hat{\theta}_2) + \gamma_{12}(y - w\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \quad (7)$$

$$\hat{\theta}_2 = \gamma_{21}(wy - w^2\hat{\theta}_1 - w\hat{\theta}_2) + \gamma_{22}(y - w\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2) \quad (8)$$

Para resolver estas ecuaciones, se propone un circuito analógico que se encargue de obtener los valores deseados. El circuito tiene como entradas w , y , γ_{11} , γ_{12} , γ_{21} y γ_{22} . Las dos primeras son señales medidas u obtenidas directamente a través de mediciones y el resto son definidas por el diseñador. Las salidas de este circuito corresponden a $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ como se puede observar en la figura 1. Este primer diagrama se divide en distintos bloques encargados de resolver cada una de las partes de la ecuación que se mostrará más adelante.

En las ecuaciones (7) y (8) se tienen algunas multiplicaciones de distintas señales las cuales se redefinen de la siguiente manera para su utilización posteriormente:

$$p_1 = wy;$$

$$p_2 = w^2\hat{\theta}_1;$$

$$p_3 = w\hat{\theta}_2;$$

$$p_4 = w\hat{\theta}_1;$$

Diagramas de bloques para el estimador

El bloque que se muestra en la figura 1 contiene internamente distintas funciones. Estas funciones están definidas por los bloques que se muestra en la figura 2, donde cada uno de estos tiene una función específica. Los bloques Ec.(5) y Ec.(6) se requieren para resolver cada una de las ecuaciones de manera individual. En este diagrama se observa que los dos bloques se encargan de obtener las ecuaciones (5) y (6), donde la salida de estas es integrada para obtener las salidas correspondientes $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$.

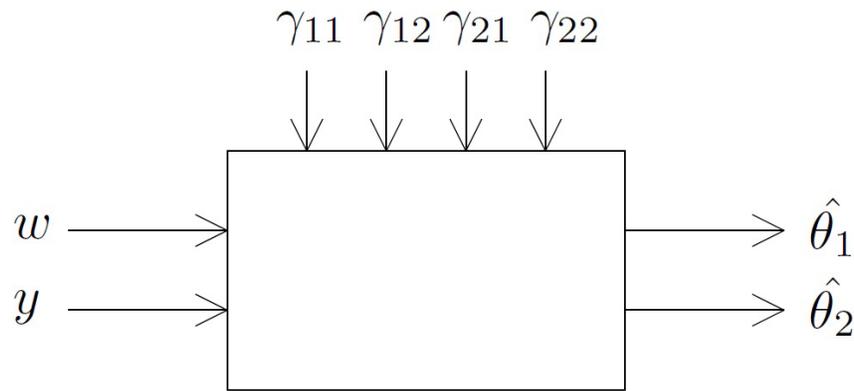


Figura 1: Diagrama general para resolver las ecuaciones (5) y (6).

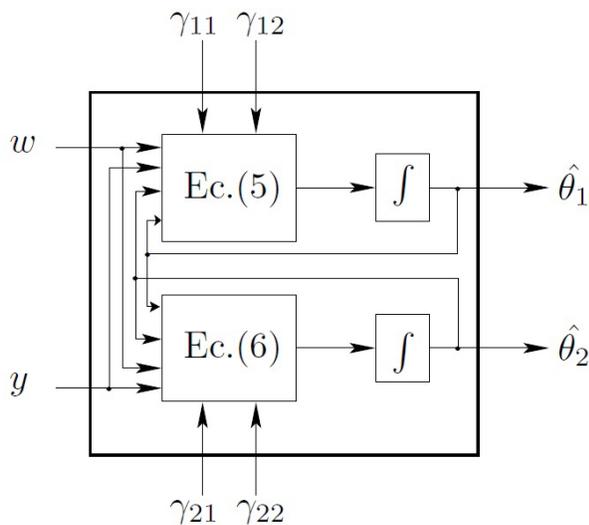


Figura 2: División de bloques internos del diagrama general.

Cada uno de los bloques encargados de resolver las ecuaciones está conformado por una configuración como la del diagrama de la figura 3. En esta figura los bloques de la izquierda se encargan cada uno de obtener, p_1, p_2, p_3 y p_4 . Luego, las señales p_1, p_2, p_3 se suman para ser escaladas con una ganancia de γ_{x1} , donde x puede tomar el valor de 1 o 2, según sea la ecuación que se está resolviendo para escalar con el valor correspondiente. De la misma manera sucede con las señales p_4 y $\hat{\theta}_2$, que se suman para amplificarlas con γ_{x2} . Estas dos salidas amplificadas son sumadas para obtener $\hat{\theta}_1$ o $\hat{\theta}_2$ según sea el caso, y proceder a integrarlas para obtener $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ y respectivamente.

Obtención de señales del panel fotovoltaico

Para realizar la estimación deseada se necesitan dos señales provenientes del panel solar que son i_{pv} y v_{pv} . Para obtener estas señales se requiere utilizar un circuito de medición como el que se muestra en la figura 4. La tensión v_{pv} es la señal medida directamente entre las terminales del panel y la corriente i_{pv} se obtiene dividiendo la tensión de la resistencia R_i entre el valor de esta. Las resistencias R_m y R_i deben ser de valores bajos para que no afecte significativamente el valor de la tensión del panel.

Las señales que se requieren para el funcionamiento del estimador son las denominadas y y w . Donde como se definió anteriormente $y = \ln(Sp_1 - i_{pv})$ y $w = v_{pv}$. Para obtener w se utiliza la señal medida directamente de las terminales del panel y para y se debe agregar algunas configuraciones con amplificadores operacionales que resuelven esta ecuación.

Obtención de la señal y

Para obtener la señal y , primero se debe tener el valor de i_{pv} y de Sp_1 , este último se obtiene como se explicó antes. Luego, con estos valores se debe realizar una configuración para restar. Además de esto se crea otra configuración para obtener el logaritmo natural y con esto se obtiene y . Esta etapa de obtención de y se observa en la figura 5.

La configuración para obtener el logaritmo natural de una entrada específica se muestra en la figura 6. Aquí se seleccionan los valores adecuados de resistencias tomando en cuenta la propiedad de la corriente en el diodo de un logaritmo natural.

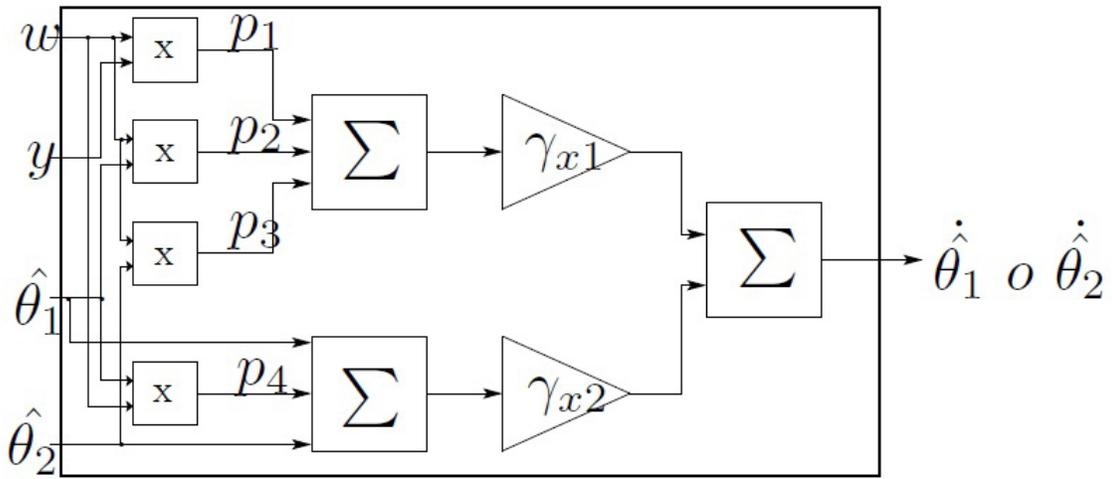


Figura 3: Diagrama de bloques para resolver cada ecuación.

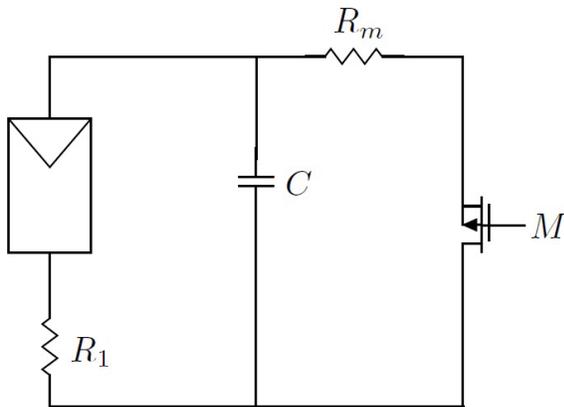


Figura 4: Circuito de medición de i_{pv} y v_{pv}

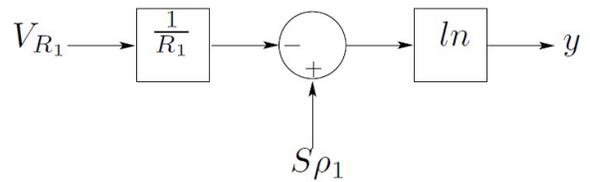


Figura 5: Diagrama de bloques para obtención de y .

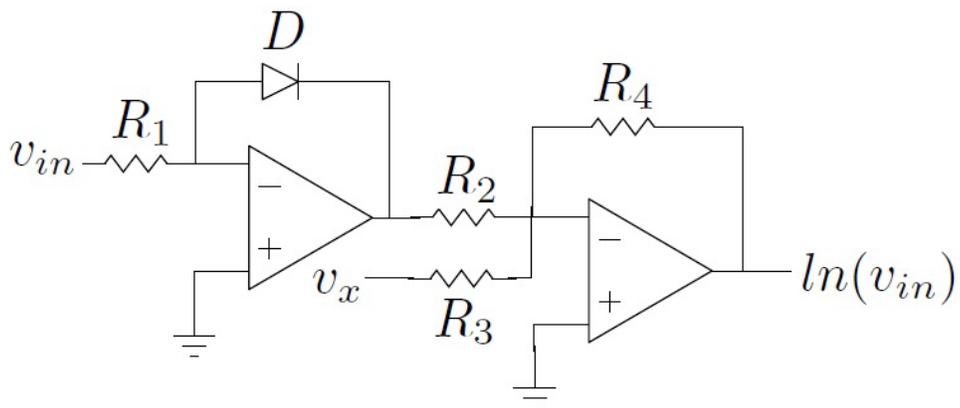


Figura 6: Circuito para obtener el logaritmo natural.

Diseño de configuraciones analógicas para el circuito estimador de parámetros

En esta sección se explicarán las configuraciones propuestas para resolver cada etapa de las ecuaciones (5) y (6).

Multiplicación de señales

Lo primero que se debe resolver para obtener los resultados correctos de las ecuaciones (5) y (6) son las multiplicaciones para obtener p_1 , p_2 , p_3 y p_4 . Cada una de estas se puede resolver utilizando uno o más circuitos de multiplicación, según sea el caso, con el diseño que se muestra en la figura 7. Este circuito se encarga de realizar la multiplicación entre s_1 y s_2 por medio del logaritmo, sus entradas son s_1 y s_2 y la salida correspondiente es $s_1 s_2$. Para que este circuito funcione de manera correcta todos los diodos deben ser iguales, y lo mismo debe suceder con las resistencias. Con esto, al aplicar el logaritmo natural al inicio y el antilogaritmo al final se cancelan los parámetros del diodo por ser iguales y se obtiene la multiplicación de señales deseada. Para obtener p_1 , p_3 y p_4 se utiliza una configuración de este circuito para cada uno, y para p_2 también es una configuración pero una de sus entradas será p_4 , con esto se evita tener que utilizar dos etapas de multiplicación para la obtención de p_2 .

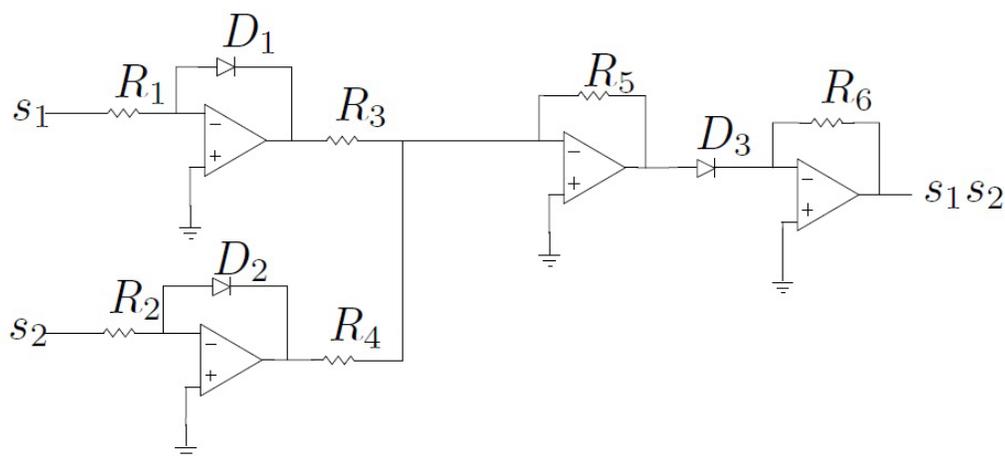


Figura 7: Circuito de multiplicación con amplificadores operacionales.

Suma y resta de señales

Luego de obtener la multiplicación de las distintas señales estas se deben sumar entre sí con alguna de las entradas provenientes del panel. Para realizar estas sumas se utiliza la configuración que se muestra en la figura 8. Donde la salida de este circuito es la suma de las entradas invertida, esto si se cumple que $R_1=R_2=R_3=R_4$.

Este circuito, también, se utiliza para restar algunas señales ya que al invertir la señal que se desea restar y colocarla en una de las entradas de este circuito estas se restaran, siempre obteniendo el resultado invertido.

Ganancias variables

Una vez realizada la suma de las señales provenientes de las multiplicaciones sigue la etapa de las ganancias. Para obtener las ganancias deseadas γ_{11} , γ_{12} , γ_{21} y γ_{22} , se utilizan amplificadores operacionales, con la configuración de amplificación no inversora mostrada en la figura 9 ajustando sus ganancias con un potenciómetro en R_2 . La ecuación de este circuito está dada por:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

con $R_3=R_1//R_2$.

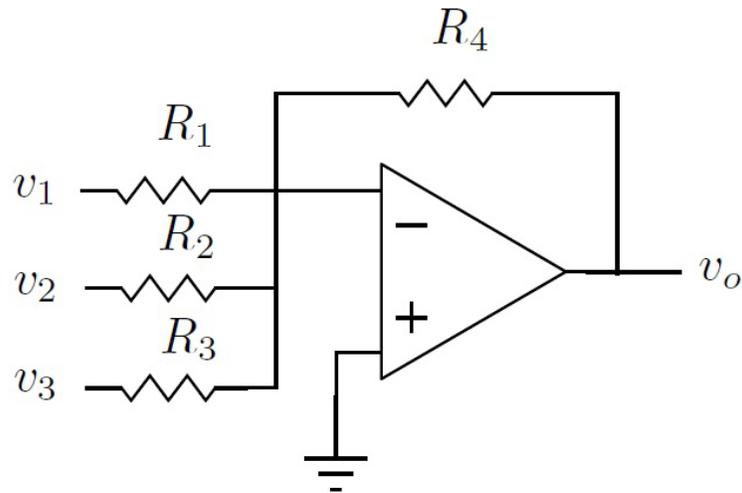


Figura 8: Configuración de sumador inversor.

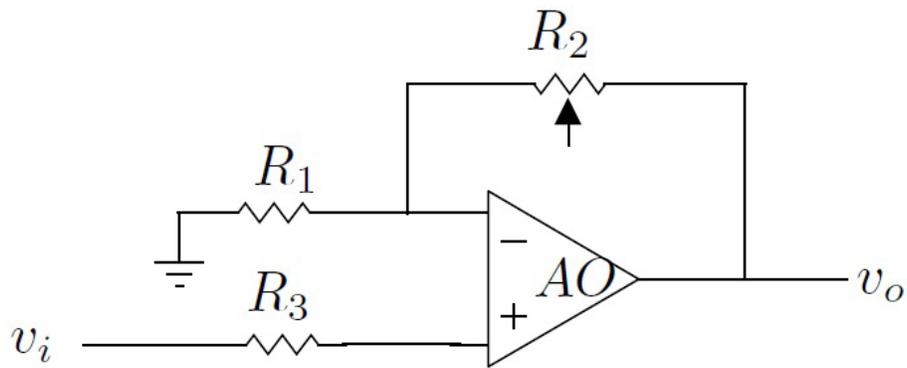


Figura 9: Circuito amplificador no inversor.

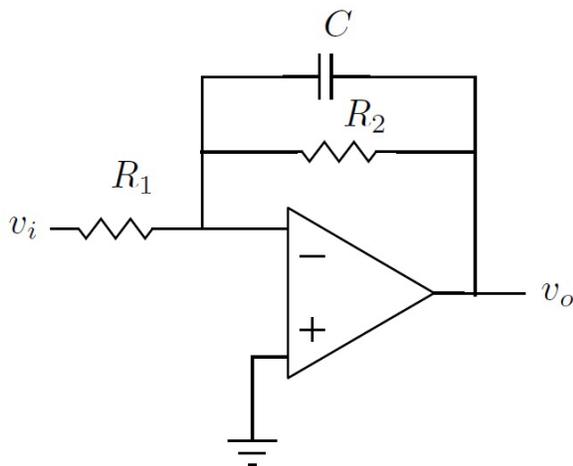


Figura 10: Configuración de circuito integrador

Con las salidas obtenidas de cada bloque de las ganancias se procede a realizar la suma para obtener $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$, con la configuración de la Fig.8.

Integración de la señal obtenida

Para finalizar la obtención de $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$ y se deben integrar las señales obtenidas en el paso anterior, y $\hat{\theta}_1$ y $\hat{\theta}_2$. Para esto, se deben utilizar dos configuraciones como las de figura 10. Esta configuración se encarga de obtener la integral de la entrada con una ganancia que depende de los valores de las resistencias y la capacitancia. Para esto, se deben seleccionar los valores adecuados de estos componentes para que no afecten el resultado que se desea obtener.

Conclusión

Con las distintas configuraciones de amplificadores operacionales explicadas en este documento se puede crear el circuito analógico capaz de estimar los valores de los parámetros deseados. Además de estas configuraciones, se debe tomar en cuenta posibles etapas de ganancia que puede que sean necesarias para amplificar o atenuar las señales o algún filtro para obtener una señal sin interferencias exteriores.

El siguiente paso por realizar es la implementación del diseño propuesto en este documento. Para esto, se debe tomar en cuenta el panel con el que se trabajará para definir los parámetros correspondientes de manera correcta.

Referencias

- Fernández, A. (2006) Circuitos con amplificadores operacionales, Universidad de Huelva, España.
- Meza, C. and Ortega, R. (Octubre, 2013). "Control and estimation scheme for PV central inverters", en Information, Communication and Automation Technologies (ICAT), 2013 XXIV International Symposium.
- Meza, C. and Ortega, R. (Julio, 2013). "On-line estimation of the temperature dependent parameters of photovoltaic generators", en 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing.
- Slotine, J. and Li, W. (1991) "Applied nonlinear control" Massachusetts Institute of Technology, USA: Prentice-Hall International.

Modelado y simulación del comportamiento real de los componentes pasivos en el dominio de la frecuencia

Passive component's real behavior models and simulation for the frequency domain

*Luis Arturo Herrera-Vega¹
Arys Carrasquilla-Batista²*

*Fecha de recepción: 3 de abril del 2014
Fecha de aprobación: 13 de agosto del 2014*

Herrera-Vega, L; Carrasquilla-Batista, A. Objective C: Modelado y simulación del comportamiento real de los componentes pasivos en el dominio de la frecuencia. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 23-30.

- 1 Estudiante de Ingeniería Electrónica. (506)-8839-1871. Correo electrónico: aherrera.vega7447@gmail.com. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica.
- 2 Docente e Investigadora. (506)-2550-9184, Correo electrónico: acarrasquilla@itcr.ac.cr; Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica.

Palabras Clave

Capacitor; Impedancia; Inductor;
Modelos de comportamiento real;
Resistencia; Respuesta en frecuencia.

Resumen

El desarrollo de nuevos dispositivos eléctricos en nuestros tiempos implica, en primera instancia, una etapa fundamental de modelado y simulación de su comportamiento teórico en el dominio de la frecuencia, previo al desarrollo de etapas experimentales necesarias para consolidar estas ideas en un nuevo producto lo suficientemente eficaz como para ser utilizado por nuestra sociedad. En este sentido, entender el desempeño real de los componentes pasivos es indispensable para describir las características fundamentales que definen y determinan el sistema en evolución. Esencialmente, tres son los elementos eléctricos utilizados popularmente, a saber: la resistencia, el capacitor y el inductor, vitales para la creación de nuevos sensores que basan su funcionamiento en el fenómeno de inducción electromagnética.

En buena teoría, estos elementos pueden ser modelados con ecuaciones matemáticas simples, por medio de técnicas de análisis de circuitos en el estado senoidal permanente; sin embargo, en la práctica, es claro que los dispositivos presentan un comportamiento muy diferente, debido entre otros factores, a las no linealidades de los materiales empleados para su fabricación.

El presente documento pretende resumir una serie de modelos conceptuales simples desarrollados por varios autores que aproximan; de forma más precisa, el comportamiento de estos dispositivos al variar las frecuencias de operación, así como una breve descripción de los materiales utilizados en su construcción, con el objetivo de ampliar el panorama teórico para un mejor entendimiento y posterior caracterización de sistemas eléctricos.

Keywords

Capacitor; Frequency response; Inductor; Impedance; Real behavior models; Resistance.

Abstract

The development of new electrical devices in our times involves, at first, a fundamental stage of simulation modeling and theoretical behavior at the frequency domain before proceeding with the experimental steps necessary to consolidate these ideas into a new product good enough to be used in our society. In this matter, understanding the actual operation of passive components is essential to describe key characteristics that define the actual performance of the evolving system. Fundamentally, there are three most commonly used electrical elements, namely: resistance, capacitors and inductors, essential to generate new sensors that base their operation on the electromagnetic induction phenomenon.

In good theory, these elements can be modeled with simple mathematical equations by means of circuit analysis techniques in the sinusoidal permanent state, but in practice, it is clear these devices exhibit a very different behavior, due inter alia, to material's nonlinearities used for manufacturing.

This document aims to summarize a series of simple conceptual models developed by several authors that approaches, somewhat, a more precise performance characterization of these devices by varying the operating frequency, as well as a brief description of the different materials used on its construction, with the aim of expanding the theoretical overview for a better understanding and further characterization of common electrical systems.

Introducción

Los componentes pasivos son objeto de estudio profundo en los cursos introductorios de los estudiantes de ingeniería eléctrica y electrónica; donde se determina por medio tanto de un análisis físico-matemático como por técnicas circuitales en los regímenes estable y de estado senoidal permanente; su comportamiento, características y desempeño. Es así como se comprende la dinámica básica de los circuitos; y con ella, se vislumbran todas las posibles aplicaciones que se han, y seguirán desarrollándose, con el transcurso del tiempo.

Sin embargo, al trasladarse de la teoría a la práctica, fácilmente se puede comprobar que estos modelos básicos pierden su habilidad de predicción, volviéndose por tanto, un poco obsoletos. Se dice que en la realidad, todos los componentes pasivos son una mezcla de los tres elementos fundamentales, la resistencia, el inductor y el capacitor, formando así lo que comúnmente se conoce como circuitos RLC, caracterizados por una frecuencia de resonancia específica y un factor de calidad Q .

Una caracterización precisa del comportamiento de los mismos es vital para el desarrollo de nuevas tecnologías que basan su funcionamiento en el concepto de inducción electromagnética, como medidores de proximidad, o incluso sensores de flujo sanguíneo integrados dentro de implantes quirúrgicos como los actuales "stents", utilizados para tratar enfermedades cardiovasculares como la estenosis.

Existe un sinnúmero de estudios referentes a este tema, y las opiniones varían de autor a autor, atribuyendo los fenómenos observados tanto a los materiales con que los dispositivos se construyen como a la orientación que el mismo presente en el circuito final.

El presente documento pretende resumir una serie de conceptos básicos útiles para caracterizar y simular de forma apropiada; por medio de modelos que combinan estos tres componentes (cuales), el comportamiento de los elementos pasivos eléctricos con el fin de, poder desarrollar de forma aún más efectiva, cualquier diseño que implique la implementación de sistemas electrónicos para diferentes rangos de frecuencia.

Modelos de los componentes pasivos

Como se ha mencionado anteriormente, los componentes pasivos pueden caracterizarse por medio de modelos matemáticos simples, sin embargo, al momento de la práctica, su comportamiento difiere en gran medida del pronóstico teórico. A continuación se presentarán los modelos utilizados ampliamente para su representación en el dominio de la frecuencia.

La resistencia

La resistencia es la característica que le permite a los materiales conductores oponerse al flujo de corriente eléctrica a través de sí mismos. Existen dos formas básicas para caracterizar la resistencia de un material, bien por medio de sus características físicas, bien por medio de la ley de ohm.

Sin embargo, las resistencias están fabricadas con materiales no ideales, que introducen efectos no deseados en su comportamiento. Existen varios tipos de resistencias en el mercado, dependiendo del material con que se fabrican y su forma, siendo las más comunes las de hilo bobinado, las de carbono compreso y las de película fina, que generan las resistencias de montaje superficial (SMD, por sus siglas en inglés).

Los resistores comúnmente exhiben una inductancia parasita debido a su composición y las no linealidades de los materiales; sin embargo, también presentan una capacidad no deseada, causada principalmente por la interconexión en las terminales, inherente a toda red de dos puertos. Debido a esto, un modelo que aproxima eficientemente el comportamiento de la resistencia en el dominio de la frecuencia es el que se presenta en la figura 1.

Utilizando análisis circuital, la impedancia de entrada de la figura 2 puede escribirse como:

$$Z_{eq} = j\omega L_{we} + \frac{R}{j\omega RC_p + 1} \quad (1)$$

Como puede observarse en (1), la impedancia equivalente a bajas frecuencias será el valor nominal de la resistencia, y conforme la frecuencia aumenta, la reactancia comienza a jugar un papel primordial en las propiedades bajo observación. Además, es importante apreciar que el arreglo de la figura 2

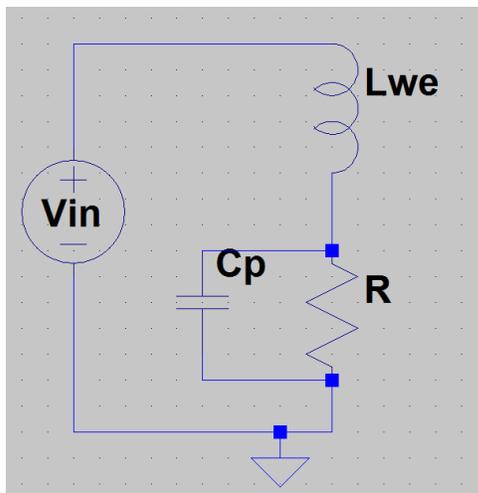


Figura 1. Modelo eléctrico de una resistencia real.

forma un circuito RLC en serie con la fuente, cuya frecuencia de resonancia esta descrita por (2) y su factor de calidad por (3):

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{we}C_p}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_{we}}{C_p}} \quad (3)$$

El cuadro 1; a continuación, presenta las características parásitas típicas de los tipos de resistencias mencionadas anteriormente.

El capacitor.

El capacitor es un componente pasivo que almacena energía en forma electrostática. Para un capacitor de placas paralelas separadas por un dieléctrico, la capacitancia C puede calcularse por medio de sus características físicas como procede:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d}; [F] \quad (4)$$

Al igual que las resistencias, existen diferentes tipos de capacitores; clasificados por el material utilizado en su construcción y su forma, siendo los más comunes los de mica, los cerámicos y los electrolíticos.

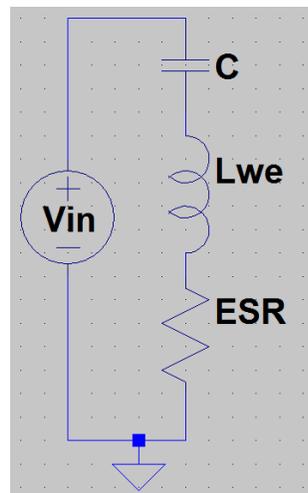


Figura 2. Modelo eléctrico de un capacitor real.

Del mismo modo, la naturaleza no ideal de los materiales produce pérdidas en el dieléctrico y efectos de conducción en las placas que se pueden modelar como una resistencia en serie ESR (equivalent series resistance, por sus siglas en ingles); junto con un inductor parásito caracterizado por la generación de campos magnéticos alrededor del dispositivo, tal y como se puede apreciar en el modelo de la figura 2.

De nuevo, un análisis circuital describe la impedancia de entrada desde la fuente como sigue:

$$Z_{eq} = ESR + j(\omega L_{we} - \frac{1}{\omega C}) \quad (5)$$

De la ecuación (5), se observa que para frecuencias bajas, la impedancia equivalente es la del capacitor nominal; sin embargo, al aumentar la frecuencia, la reactancia inductiva cobra efecto, mientras que el valor de la resistencia afecta la magnitud del factor de calidad Q . Es importante mencionar que en este modelo, la fuente generadora observa una frecuencia de resonancia en serie determinada por (6), con un factor de calidad caracterizado por (7).

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{we}C}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{ESR} \sqrt{\frac{L_{we}}{C}} \quad (7)$$

El cuadro 2 resume las características parásitas básicas de los capacitores mencionados anteriormente:

Cuadro 1. Valores característicos típicos de las resistencias más comunes.

Tipo de resistencia	R	L_{we}	C_p
Hilo Bobinado.	1 Ω - 1 G Ω	5nH - 30nH	0.1pF - 1.5pF
De carbón compreso.	1 Ω - 1 G Ω	15nH - 700nH	0.1pF - 0.8pF
De película metálica fina.	1 Ω - 1 T Ω	0.2nH - 3nH	0.01pF - 0.08pF

Cuadro 2. Valores característicos de los capacitores más comunes.

Tipo de condensador:	C	f_R	Q
De mica.	1pF - 0.1 μ F	< 10 MHz	< 500
Cerámicos.	0.5pF - 3 μ F	< 20MHz	< 1000
Electrolíticos.	0.1 μ F - 2F	< 10kHz	< 400

Utilizando los valores de la tabla anterior y las ecuaciones (6) y (7), el cuadro 3 fue tabulada como se muestra en seguida.

El inductor

A diferencia del capacitor, el inductor almacena energía por medio de efectos magnéticos. Caracterizado por su inductancia (L) debida al radio entre su flujo magnético y la corriente variable en el tiempo que lo atraviesa, como lo indica la siguiente ecuación.

$$L = \frac{\varphi}{i_L(t)}; [H] \quad (8)$$

La gran mayoría de los inductores se construyen mediante el embobinado de un cable alrededor

de un núcleo ferromagnético. Este componente pasivo es el más difícil de modelar debido a sus no linealidades como el efecto piel en alta frecuencia, la capacitancia parásita presente entre los hilos conductores próximos, la resistividad inherente del material con que se manufacturan, y la sensibilidad a los campos magnéticos producidos por inductores vecinos. El modelo que aproxima su comportamiento en frecuencia se muestra en la figura 3.

La impedancia equivalente observada desde la fuente puede describirse como sigue:

$$Z_L = \frac{(ESR + j\omega L)}{1 - \omega^2 LC_p + j\omega C_p ESR} \quad (9)$$

Observe que en este caso, la frecuencia de resonancia presente en la figura 3 es en paralelo, cuya magnitud se puede calcular a partir de la ecuación

Cuadro 3. Valores de los componentes parásitos calculados a partir del cuadro 2.

Tipo de condensador:	C	L_{we}	ESR
De mica.	1pF - 0.1 μ F	< 2.53 nH	< 31.9m Ω
Cerámicos.	0.5pF - 3 μ F	< 21.11 pH	< 15.9 m Ω
Electrolíticos.	0.1 μ F - 2F	< 2.5 mH	< 397.9 m Ω

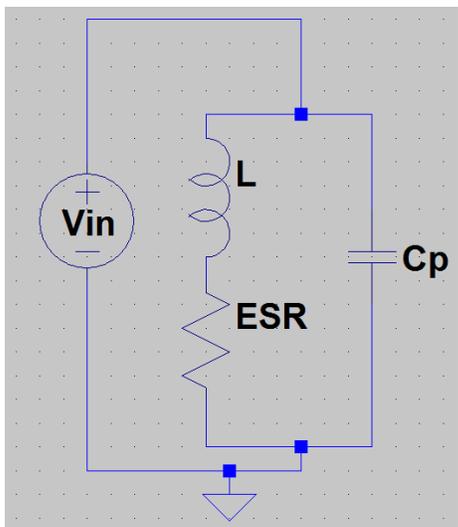


Figura 3. Modelo eléctrico de un inductor real.

(10), mientras que el factor de calidad es dado por la ecuación (11).

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LCp}} \quad (10)$$

$$Q = ESR\sqrt{\frac{Cp}{L}} \quad (11)$$

Las características típicas de los inductores con núcleo ferromagnético se resumen en el cuadro 4, a continuación.

Análisis de las simulaciones

Las ecuaciones de las impedancias características de los modelos planteados en la sección anterior fueron incorporadas en scripts para MATLAB, con

Cuadro 4. Valores típicos de los inductores de núcleo ferromagnético.

Parámetro	Valor
Q	20-100
f_r	4MHz – 900MHz
ESR	0.01Ω - 500Ω
L	0.047μH – 1mH
Cp	< 33.684pF

el objetivo de hacer un barrido en la frecuencia y observar el comportamiento de los mismos para diferentes valores característicos. En primera instancia, los valores del cuadro 1 para un resistor de hilo bobinado generaron la figura 4.

Como puede observarse de la figura anterior, al aumentar tanto el capacitor como el inductor parásito, la frecuencia propia de resonancia se mueve hacia la izquierda, como se espera según la ecuación (2). Al mismo tiempo, un aumento en el condensador parásito genera una disminución del factor de calidad, caso contrario al aumentar el inductor; tal y como lo predice la ecuación (3). Por último, se observa que al aumentar la frecuencia hasta acercarse a la de resonancia, predomina un comportamiento capacitivo, y al alejarse de la misma hacia mayores valores, el efecto predominante es inductivo.

Para un capacitor de mica y los valores característicos de los cuadros 2 y 3, la figura 5 fue construida.

Como se esperaba de la ecuación (6), un aumento en el inductor L_{we} produce un corrimiento hacia la izquierda de la frecuencia de resonancia propia del dispositivo, mientras que aumentar la resistencia equivalente en serie, no produce cambios en dicha característica, pero disminuye de forma considerable el factor de calidad del capacitor, como es de esperar según la ecuación (7). La figura 5 demuestra además que para frecuencias mayores a la de resonancia propia, el capacitor empieza a funcionar como un inductor.

Finalmente, para un inductor bobinado en un núcleo ferromagnético, con las características del cuadro 3, la impedancia modelada luce como lo muestra la figura 6.

Un aumento en ESR de la figura 6 produce un aumento en su factor de calidad, como se espera de la ecuación (11), sin afectar la auto-frecuencia de resonancia del inductor; mientras que aumentos en su capacidad parásita resultan en una disminución de la característica mencionada, como lo predice la ecuación (12). Es importante mencionar que de los tres modelos, el presente es el menos preciso, debido a la ausencia de contemplación de efectos generados por inductores vecinos, comúnmente presentes en los diseños electrónicos.

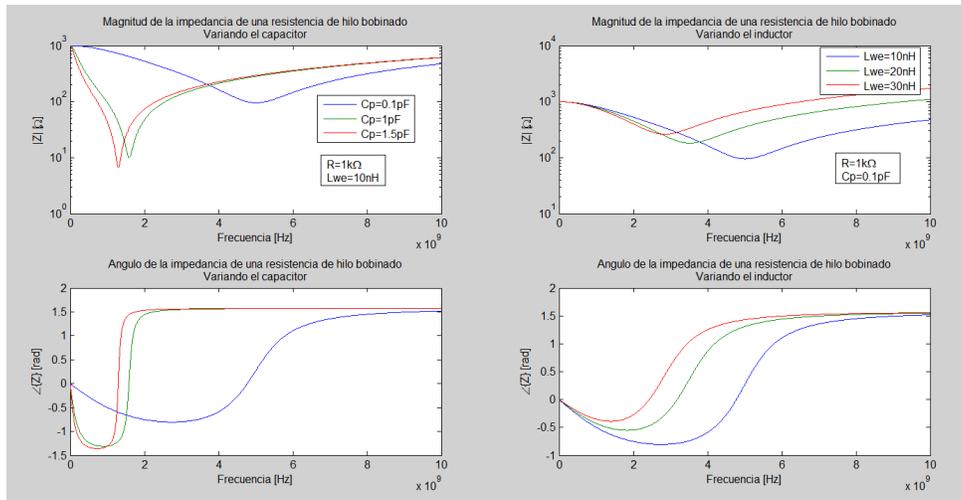


Figura 4. Impedancia característica para varios valores parásitos de una resistencia de hilo bobinado.

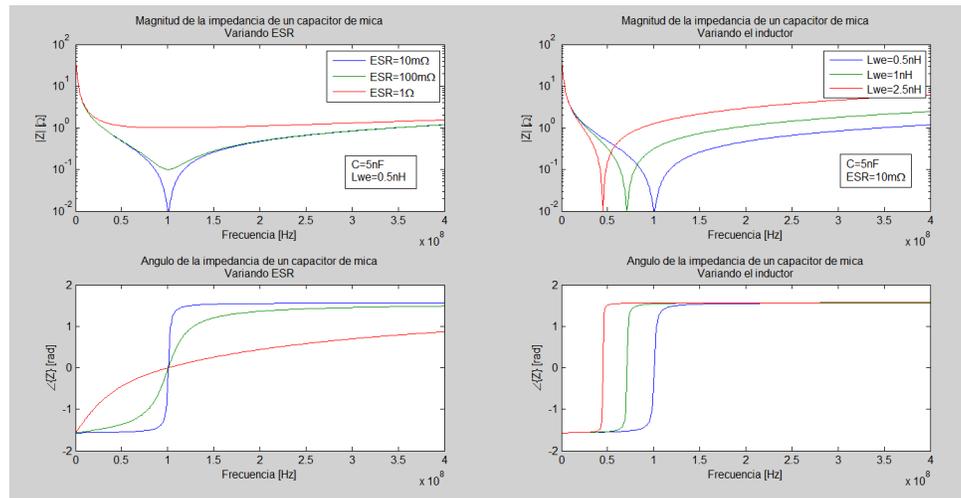


Figura 5. Impedancia característica para varios valores parásitos de un capacitor de mica.

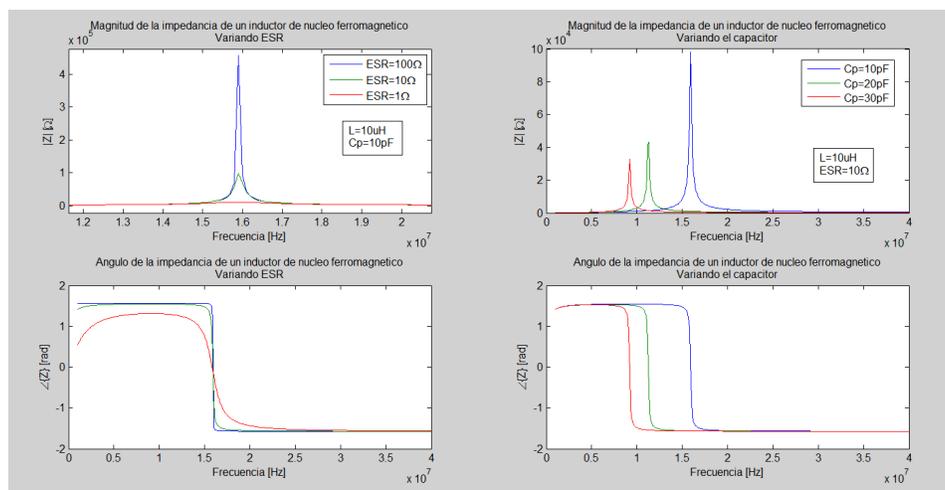


Figura 6. Impedancia característica para varios valores parásitos de un inductor de núcleo ferromagnético.

Conclusiones

Los modelos expuestos y analizados revelan que los componentes pasivos tienen un comportamiento en la frecuencia muy diferente al esperado teóricamente. Es fundamental conocer las características que gobiernan su funcionamiento con la intención de obtener una mejor descripción de un determinado diseño eléctrico. Con el objetivo de generar mejores sistemas, es primordial incluir este tipo de modelación para comprender las propiedades de los elementos bajo análisis; y sus efectos en el sistema, antes de invertir en dispositivos que de otra forma significaran un gasto innecesario de recursos.

Referencias

- Breed, G. (2006). *Fundamentals of Passive Component Behavior at High Frequencies*: Summit Technical Media.
- Floyd, T. (2000). *Principles of Electric Circuits* (Sexta ed.) New Jersey: Prentice Hall.
- Hayt, W., Kemmerly, J. & Durbin, S. (2007). *Análisis de Circuitos en Ingeniería* (Séptima Edición ed.) Mexico DF: Mc Graw Hill Interamericana.
- Kaiser, K. (2005). *Electromagnetic Compatibility Handbook* (Primera ed.) Florida: CRC Press.
- Michigan State University - College of Engineering *Electromagnetic Compatibility (EMC) Course Notes, Module 5* Recuperado el 28 de Marzo del 2014, de http://www.egr.msu.edu/em/research/goali/notes/module5_nonideal_behavior.pdf
- Niknejad, A. & Dunsmore, J. (2013). *High Frequency Passive Components* California: University of California.

Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero

Concepts and implementation of PID
controllers in a smelting furnace steel

Pablo Javier Jiménez-Ceciliano¹

*Fecha de recepción: 12 de marzo del 2014
Fecha de aprobación: 14 de julio del 2014*

Jiménez-Ceciliano, P. Conceptos de controladores PID e implementación en un horno de fundición de acero. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 31-40.

¹ Estudiante de Ingeniería en Mantenimiento industrial, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago Costa Rica. Estudiante de Meteorología Escuela de Física Universidad de Costa Rica Rodrigo Facio, San Pedro, Costa Rica Teléfono: (506) 89555140. Correo electrónico: pablojcl75@hotmail.com.

Palabras clave

Controladores; Automatización; Fundición; Control; Estabilidad; Sintonización; Error; Ganancia; Identificación; función de transferencia.

Resumen

La importancia en la industria de tener los procesos debidamente controlados para evitar que estos salgan de su respectivo punto de operación ha llevado a desarrollar distintos sistemas de control, en el presente artículo se describe uno de tantos sistemas, los controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo).

Estos controladores se encargan de mantener un proceso en un estado de trabajo estable, cuando se presenten variaciones controladas o aleatorias el sistema por medio de una función de transferencia y los parámetros de sintonización del controlador se encargan de regresar el sistema a su respectivo punto de operación.

Además se analizarán distintas gráficas generadas por medio de la herramienta de SIMULINK de MATLAB para facilitar la comprensión de los conceptos y del caso en estudio, la identificación, sintonización también son parte de dicho estudio.

Keywords

Controllers; Automation; Foundry; Control; Stability Tuning; Error; Gain; ID; transfer function.

Abstract

The importance in the industry of having accurately controlled process to avoid that they run out of their specific operating point, has led to develop different control systems, the following article describes one of many systems, the PID drivers (Proportional, Integral, Derivative).

The importance in the industry of having accurately controlled process to avoid that they run out of their specific operating point, has led to develop different control systems, the following article describes one of many systems, the PID drivers (Proportional, Integral, Derivative).

These drivers are in charge to maintain a process in on stable state of work, when there are controlled or random variations of the system by a transfer function, the tuning parameters of the driver are in charge to bring back the system at its respective operating point.

Moreover, different graphics generated by the SIMULINK tool of MATLAB will be analyzed to facilitate the concepts comprehension and in this study, the identification and tuning are also on important part of it.

Introducción

Durante la historia la utilización del acero como material de construcción ha sido indispensable, debido a esto el desarrollo de procesos para la producción del mismo y los equipos para la obtención de fundiciones son muy variados, estos se clasifican según la temperatura que se necesita para fundir un determinado material, dentro de los hornos utilizados se pueden destacar: el Horno de Cubilote, Aire, Crisol, Cuba, Reverbero, Arco Eléctrico, Inducción. (D. Morre, R. Kibbey, 2002). Estos hornos se encargan de refinar el arrabio el cual se obtiene del alto horno (mineral de hierro, coque y piedra caliza), y así producir un acero de alta calidad. Los aceros se van a clasificar según la cantidad de carbono pre-

sente en su composición, estos son aleaciones que contiene menos de 2.11% de carbono dentro de los cuales se pueden encontrar acero de bajo carbono (menos de 0.25%), acero de medio carbono (entre de 0.25 y 0.55%), y los aceros de alto carbono (más de 0.55%); por otra parte las aleaciones que contienen entre 2.11 y 6.67% son considerados hierros fundidos. Las distintas formas tanto de aceros como de hierros fundidos se pueden observar en la figura 1. (Vergara, 2010)

Como se mencionó anteriormente la principal característica para la selección de un horno es el rango de temperatura en la que puede trabajar; esta propiedad es de gran importancia ya que gracias a ésta se va a llevar el proceso de fundición y la

obtención de las propiedades deseadas al finalizar el proceso. Según la temperatura y el porcentaje de carbono se dan diferentes formaciones y distintas propiedades al acero esto se muestra en el diagrama Fe-C; sin embargo también se pueden realizar tratamientos térmicos a las piezas para darles características adicionales a estas, de aquí surge la gran importancia de tener un adecuado y preciso control de la temperatura.

En el presente artículo se muestran las etapas para desarrollar un adecuado sistema de control por medio de controladores PID. En su primera parte se expondrá el concepto y funcionamiento de dichos controladores, se encontrará la función que va a controlar la temperatura y finalmente se mostrara una simulación con los resultados obtenidos.

Controladores

En un sistema de control el controlador es el "cerebro" del circuito, esté es el que toma la decisión de llevar una determinada acción a cabo. Para esto el controlador realiza las siguientes acciones:

- Compara la señal del proceso (variable controlada) contra el punto de control.

- Envía la señal de control apropiada al elemento final de control, para mantener la variable controlada en el punto de control. (A. Smith, B. Corripio, 1991)

Tomando en cuenta las acciones anteriores es como el controlador lleva a cabo su función durante el proceso; a continuación se exponen los tipos de controladores más utilizados, se mencionan las principales características para la adecuada selección.

Criterio de estabilidad

Existen 3 requerimientos de estudio para el adecuado diseño de un sistema de control (Respuesta transitoria, Estabilidad y Error de estado estable); la estabilidad, considerado el criterio más importante ya que para un sistema inestable la respuesta transitoria y el error de estado estable pueden ser puntos debatibles. La respuesta total de un sistema es la suma de la respuesta libre y la respuesta forzada; una respuesta libre describe la forma en que un sistema disipa o adquiere energía y la forma natural de esta depende únicamente del sistema, mientras la respuesta forzada depende únicamente de la entrada. Para que un sistema de control sea útil la respuesta libre debe aproximarse a cero dejando únicamente la respuesta forzada. Por lo tanto un sis-

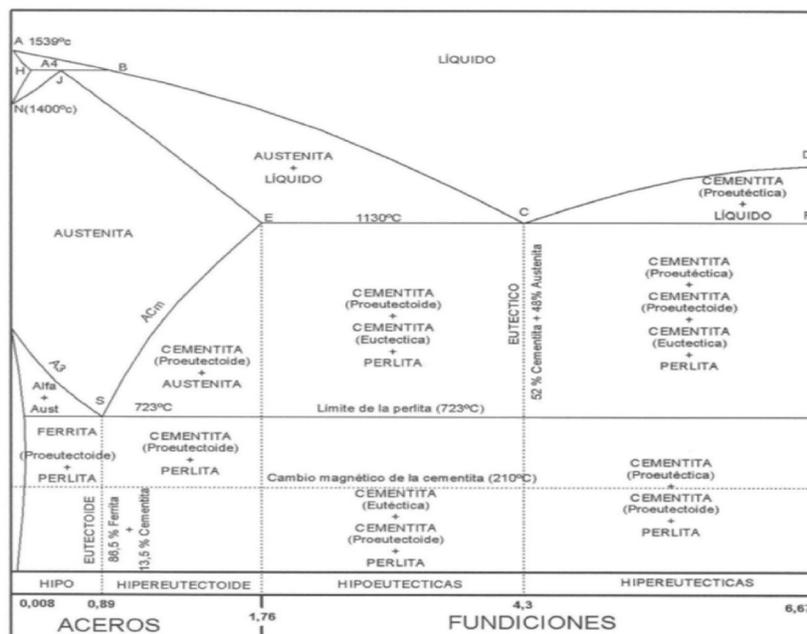


Figura 1. Diagrama Fe- Cementita tomado de tecnología de Materiales II (Castillo, 2007)

tema es estable siempre y cuando la respuesta libre tienda a cero conforme el tiempo tienda al infinito, y a su vez la respuesta forzada permanezca constante (Nise, 2012).

Es de gran importancia determinar si el sistema es estable o inestable para esto basta con saber la ubicación de los polos sobre el plano s ; y para que se dé la estabilidad del mismo, estos deberán estar ubicados en el semiplano izquierdo; a continuación se menciona un método para conocer dicha información.

Criterio de Routh-Hurwitz

Con el uso de este método se podrá determinar cuántos polos tiene el sistema en el semiplano izquierdo, en el derecho y sobre el eje, sin embargo solamente se conocerá la cantidad no las coordenadas de cada polo. Este método consta de los siguientes pasos:

- Generar tabla de datos llamada arreglo de Routh.
- Interpretar el arreglo de Routh para determinar cuántos polos existen.

Para la función de transferencia equivalente mostrada en la figura 2, se tomará el denominador y con este se determinará la ubicación de los polos mediante el arreglo de Routh que se muestra en el cuadro 1.

Luego de la generación del arreglo de Routh se utiliza el criterio de Routh-Hurwitz que expresa que el número de raíces del polinomio que están en el semiplano derecho es igual al número de cambios de signo de la primera columna. (Nise, 2012)

Ya conociendo el criterio de estabilidad mencionado anteriormente, se continuará a definir los conceptos y funcionamiento básico de cada uno de los controladores más usados en la industria.

Controlador Proporcional (P)

Es el controlador más simple en su funcionamiento, éste reacciona proporcionalmente al error y se describe por la siguiente ecuación:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) \quad (1)$$

$m(t)$ = Salida del controlador
 \bar{m} = Valor base
 $e(t)$ = señal de error
 K_c = Ganancia del controlador

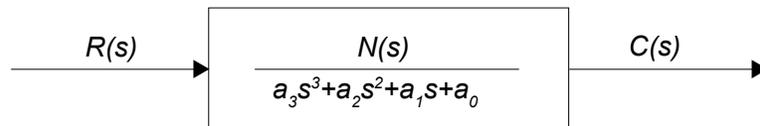


Figura 2. Función de transferencia equivalente.

Cuadro 1. Arreglo de Routh completo.

s^3	a_3	a_1
s^2	a_2	a_0
s^1	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix}}{a_2} = b_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_3 & 0 \\ a_2 & 0 \end{vmatrix}}{a_2} = 0$
s^0	$-\frac{\begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	$-\frac{\begin{vmatrix} a_2 & a_1 \\ b_2 & a_0 \end{vmatrix}}{b_1} = 0$

Este tipo de controladores poseen la ventaja de tener solamente un parámetro de ajuste K_c , sin embargo tienen una desventaja ya que estos operan con una desviación o error de estado estable. En cuanto al parámetro de ajuste se debe mencionar que entre más grande sea el valor de éste menor será la desviación pero la respuesta del proceso se puede volver oscilatoria. (Smith et al, 1991)

Este comportamiento se observa en la figura 2, como aumenta la oscilación a mayores valores de K_c y como disminuye el error de estado estable, esto para una determinada respuesta a escalón de una función de transferencia dada.

La función de transferencia del controlador proporcional es la siguiente:

$$G(s) = K_c \quad (2)$$

Controlador Proporcional-Integral (PI)

El aspecto integral le da inteligencia al controlador ya que la mayoría de los procesos no pueden trabajar con desviación, éste logra que el sistema trabaje en el punto de control; la ecuación descriptiva es la siguiente:

$$M(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt \quad (3)$$

T_I = tiempo de integración o reajuste

Este controlador logra eliminar la desviación integrando el error constantemente y de esta manera en determinado momento el error será cero y la integral una constante. Para este controlador la función de transferencia está dada por:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{I}{\tau_I s} \right) \quad (4)$$

Smith (1991) menciona que probablemente el 75% de los controladores sean de este tipo.

En la figura 3 se observa cómo se elimina el error de estado estable con la operación del criterio integral y como la integración del error es más rápida conforme se aumenta el tiempo de reajuste.

Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Cuando se añade la acción derivativa el controlador logra anticipar hacia dónde va el proceso, esto mediante la observación del cambio en la rapidez del error, su derivada. (Smith et al, 1991)

La ecuación descriptiva para este controlador es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

T_D = Rapidez de derivación

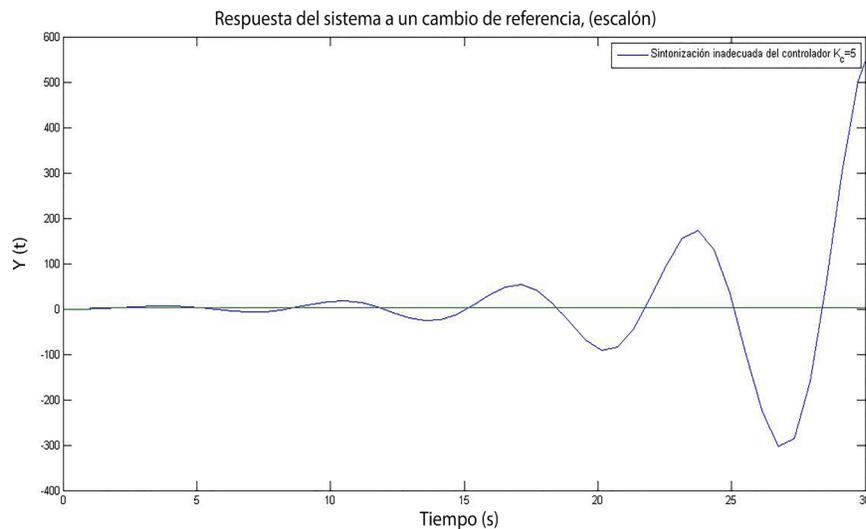


Figura 3. Sintonización inadecuada.

En este controlador la variación del parámetro τ_D determina la anticipación del sistema a cambios; sin embargo se debe tener cuidado con la manipulación del mismo debido a que si no se sintoniza adecuadamente se introducirá ruido a la salida y el régimen puede volverse no controlable.

La función de transferencia para el PID es:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{I}{T_I s} + \tau_D s \right) (b)$$

En la figura 4 se muestra una adecuada sintonización del controlador PID, también se observa una inadecuada selección del valor de τ_D la cual causa que el sistema oscile y la salida salga de control.

cuada selección del valor de τ_D la cual causa que el sistema oscile y la salida salga de control.

Identificación y resultados

Luego de conocer los conceptos básicos de los controladores se puede iniciar a realizar la identificación del proceso y sintonización del controlador para el adecuado funcionamiento del sistema. A continuación se muestra los datos tomados en un horno de fundición se trazará la gráfica y así se podrá realizar la identificación del proceso.

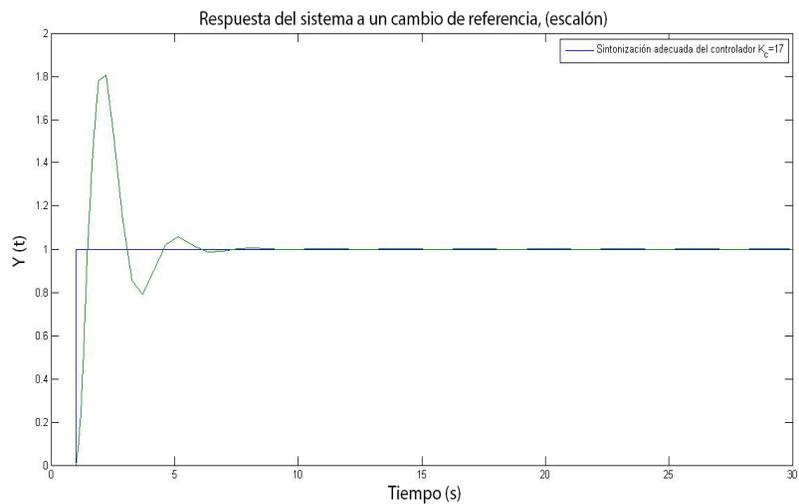


Figura 4. Sintonización adecuada.

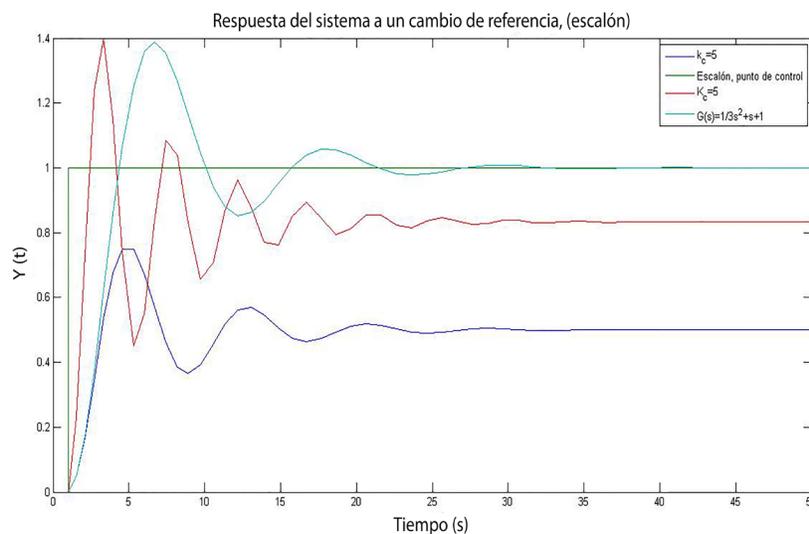


Figura 5. Comportamiento para distintas ganancias del controlador $[K]_c$.

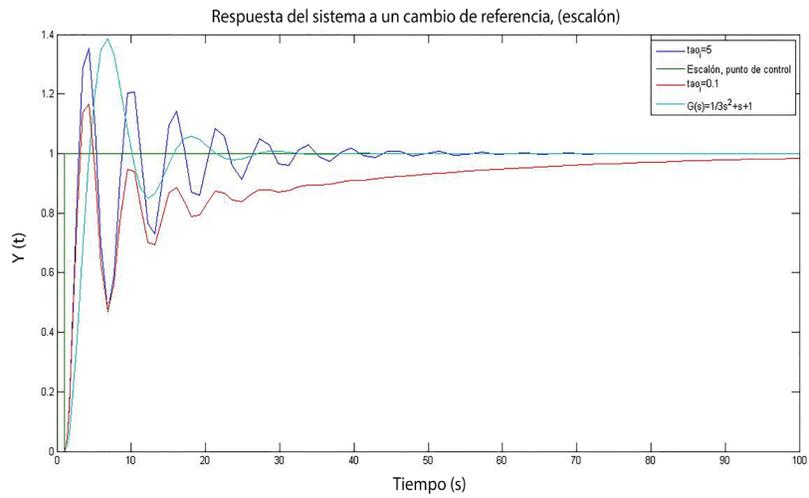


Figura 6. Comportamiento para distintos tiempos de integración τ_I .

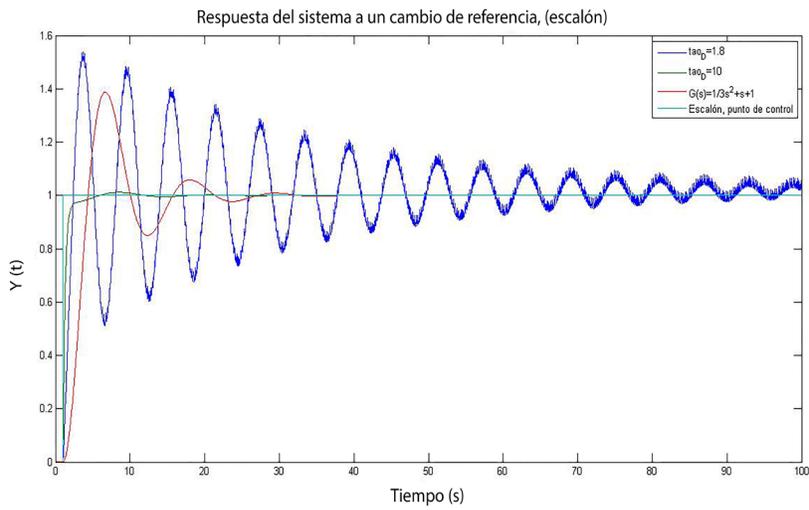


Figura 7. Comportamiento para distintos valores de tiempo de derivación τ_D

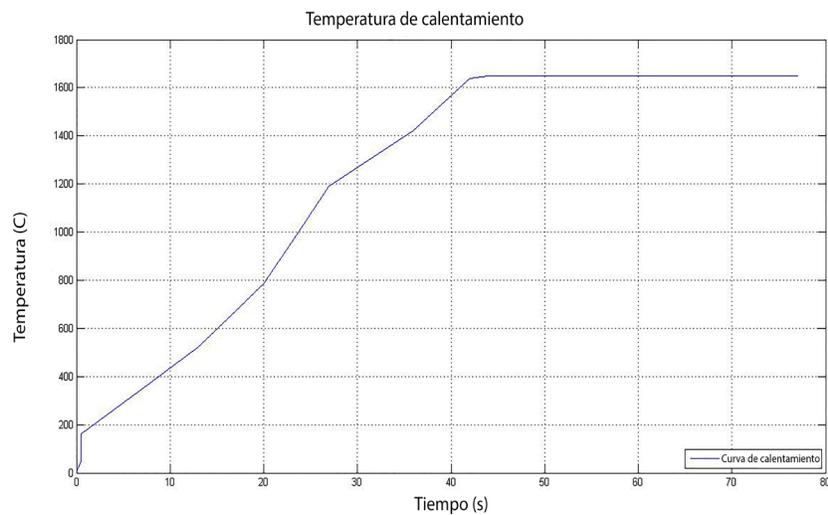


Figura 8. Grafica del proceso.

Cuadro 2. Resultados de temperatura y tiempo para horno de fundición.

Tiempo (hr)	Temperatura (°C)
0.00	0
0.50	50
0.50	160
6.75	340
13.00	520
16.50	653
19.99	785
23.49	988
26.99	1190
35.97	1420
41.98	1640
43.98	1650
51.98	1650
69.04	1650
77.05	1650

Observando que se trata de un sistema de primer orden la función de transferencia va a estar dada por:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{Ts + 1}$$

Donde la ganancia se calcula a continuación:

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} = K = \frac{1650}{10} = 165$$

Donde el ΔY es la variable de salida del sistema y ΔX será la variable de entrada con un valor definido por una función escalón seleccionada. Para encontrar el valor de θ se utilizará el criterio del 62,3% del cambio total del sistema para determinar este parámetro el procedimiento se muestra en la figura 9.

Por lo tanto la función de transferencia va a estar dada de la siguiente manera:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{165e^{-0*s}}{24.44s + 1} = \frac{165}{24.44s + 1}$$

Ahora utilizando la herramienta Simulink de MATLAB se puede simular dicho proceso y proceder a dimensionar el adecuado controlador para cambios en referencia y en perturbaciones. En la figura 10 se muestra el diagrama realizado para simular el proceso, se selecciona un controlador

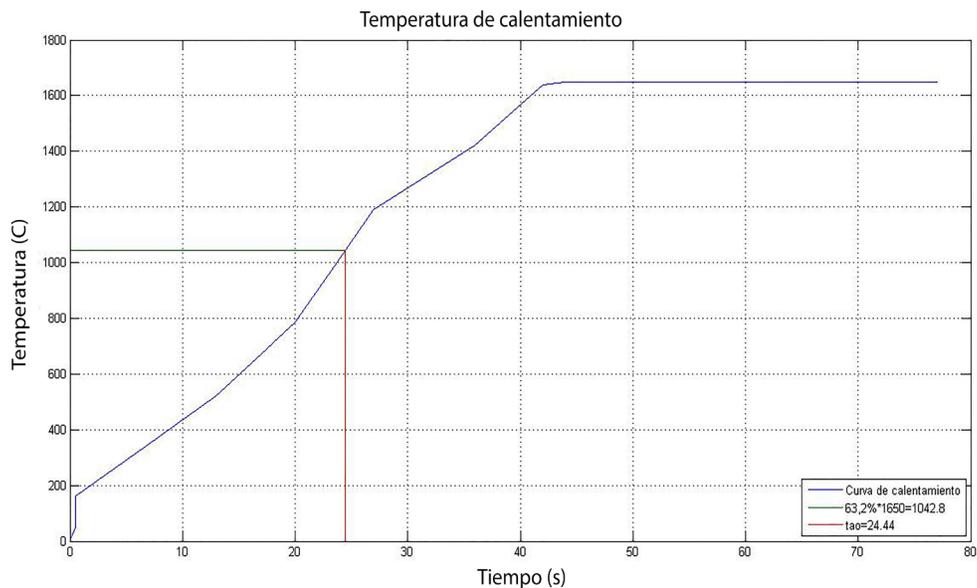


Figura 9. Identificación del proceso.

PI, se analizó utilizando distintos criterios existentes (ITAE, IAE, ISE) y se determinó que la mejor sintonización se obtenía con el criterio ITAE con los valores que se muestran en el cuadro 3.

Observando el sistema cuando se realizan los cambios tanto en referencia como en perturbación podemos ver cómo reacciona el controlador PI sobre el sistema respecto a las alteraciones que está sufriendo y logra controlarlo adecuadamente, este comportamiento lo observamos en la figura 11. Dado que es un sistema de fundición no es tan importante evitar que se den los picos que se muestran en la figura 11 sin embargo esto si se debe

evitar estrictamente en casos de que sea un sistema de tratamiento térmico ya que por una pequeña variación e la temperatura se afectara la microestructura del material.

Conclusiones

Se demuestra que para un controlador P a mayores valores de k_c el sistema disminuye el error de estado pero se vuelve oscilatorio.

Se concluye que para un controlador PI a mayores valores de k_c es más rápida la disminución del error de estado estable pero el sistema se vuelve oscilatorio.

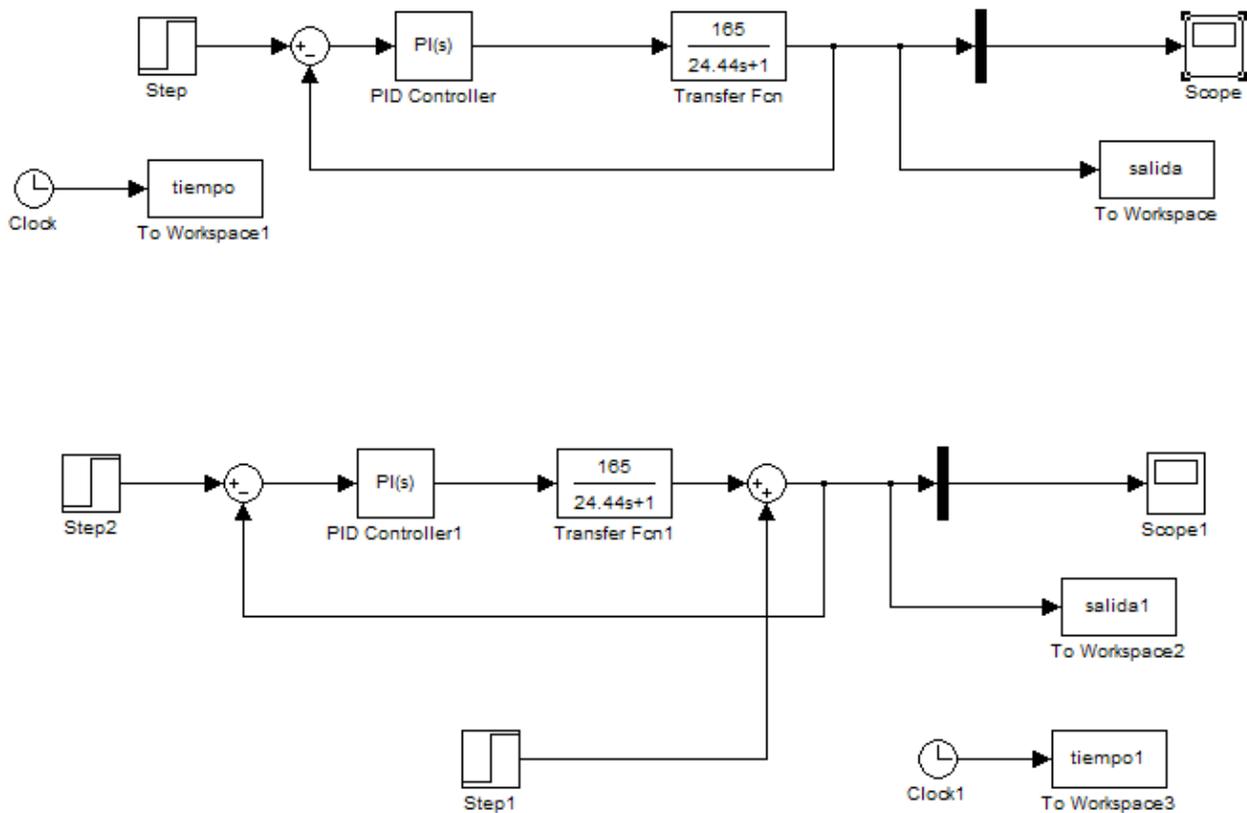


Figura 10. Simulación para cambio en referencia y perturbación del sistema.

Cuadro 3. Valores para la sintonización del controlador:

	Perturbación	Referencia
K	0.0023	0.0007
tI	0.3735	0.5718

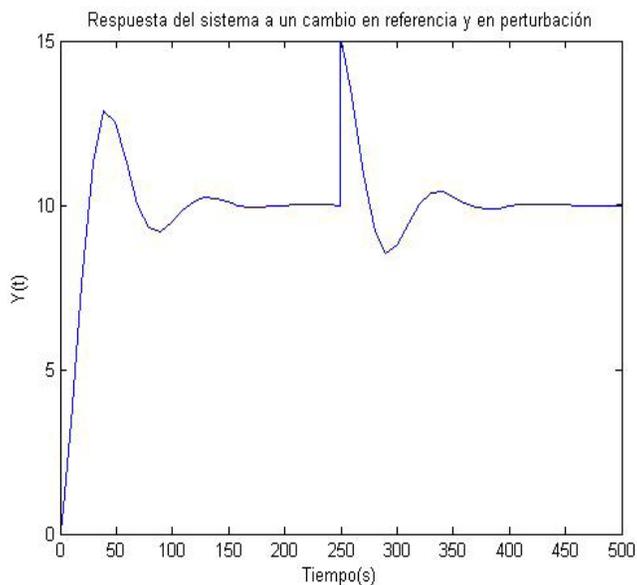


Figura 1. Simulación para cambios en referencia y perturbación.

Se expone que para sistemas no tan estrictos como hornos de fundición pueden haber variaciones en el sistema de control sin embargo para procesos de tratamientos térmicos se debe evitar completamente.

Bibliografía

- Amadori, A. (s.f.). *El ABC de la automatización*. Obtenido de <http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/sistemas-de-control-automatico.pdf>
- Castillo, F. D. (2007). *Tecnología de Materiales II*.
- Madrigal, A., Valverde, J., & Villalobos, E. (2002). *Controladores PID, aplicación al control de velocidad de un motor de cc*. San José.

Mazzone, V. (Marzo de 2002). *Controladores PID*. Obtenido de <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>

Moore, H. D. (2002). *Materiales y procesos de fabricación*. México, D.F.: LIMUSA.

Nise, N. S. (2012). *Sistemas de control para ingeniería*. México: Grupo Editorial Patria.

R.Mazaeda, C. D. (s.f.). Ajuste Automático de controladores PID. 5.

Smith et al, C. A. (1991). *Control Automático de procesos*. Mexico D.F.: LIMUSA, S.A.

Vergara, M. E. (2010). *Tecnología de Materiales*. México: Trillas.

Rol de la Tropomiosina y del Adaptador Nedd9 durante la invasión celular de *Listeria Mnocytogenes*

Tropomyosin and NEDD9 adapter roll to cell invasion by *L. monocytogenes*

Kattia Núñez-Montero¹
Andreas Kühbacher²
Johnny Peraza³
Pascale Cossart⁴
Javier Pizarro-Cerdá⁵

Fecha de recepción: 15 de febrero del 2014
Fecha de aprobación: 27 de marzo del 2014

Núñez-Montero, K; Kühbacher, A; Peraza, J; Cossart, P; Pizarro-Cerdá, J. Rol de la Tropomiosina y del Adaptador Nedd9 durante la invasión celular de *Listeria Mnocytogenes*. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 41-48.

- 1 Ingeniera en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Teléfono: 86748144. Correo electrónico: kmontero.nu@gmail.com.
- 2 Investigador; PhD. Biología. Instituto Pasteur; Unidad de Interacción Bacteria-Célula. Paris, Francia. Teléfono: +33(0) 140613779. Correo electrónico: andreas.kuehbacher@pasteur.fr
- 3 Docente Investigador; MSc. Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Biología. Cartago, Costa Rica. Teléfono: 25509025. Correo electrónico: jperaza@gmail.com.
- 4 Director de departamento, PhD. Ciencias Físicas. Instituto Pasteur; Unidad de Interacción Bacteria-Célula. Paris, Francia. Teléfono: +33(0) 140613779. Correo electrónico: pascale.cossart@pasteur.fr
- 5 Investigador; PhD. Inmunología. Instituto Pasteur; Unidad de Interacción Bacteria-Célula. Paris, Francia. Teléfono: +33(0) 140613779. Correo electrónico: javierpizarro-cerda@pasteur.fr

Palabras Clave

Tropomiosina; NEDD9; invasión bacteriana; *Listeria monocytogenes*; patogénesis; nucleación de actina.

Resumen

Listeria monocytogenes es un patógeno de animales y humanos que logra invadir el espacio intracelular gracias a la interacción entre proteínas bacterianas de superficie y receptores en células hospedero, lo que permite activar cascadas de señalización que promueven la internalización de esta bacteria. El silenciamiento de la expresión génica en células de mamífero gracias a la técnica de transfección de ARNs pequeños de interferencia (siARN) ha permitido recientemente asociar nuevos efectores moleculares al proceso de internalización de distintos patógenos intracelulares en células eucariotas. Esta investigación hace uso de esta técnica para determinar la posible contribución de la tropomiosina (TPM) y de la proteína adaptadora NEDD9 a la invasión celular por parte de *L. monocytogenes*, así como de *Salmonella typhimurium* y de una cepa de *Escherichia coli* que expresa la invasina de *Yersinia pseudotuberculosis*. Utilizando ensayos de invasión se demuestra que el silenciamiento de la expresión de TPM, pero no de NEDD9, reduce significativamente la entrada de los tres patógenos intracelulares estudiados. Mediante microscopía de fluorescencia se observa que el silenciamiento de TPM y NEDD9 afecta en forma diferente la morfología celular y la distribución de los filamentos de actina. Estos resultados sugieren que TPM puede modular la entrada de patógenos bacterianos mediante una modificación de las propiedades de reorganización de la membrana plasmática dependientes del citoesqueleto de actina, propiedades que difieren de aquellas afectadas por NEDD9.

Keywords

Tropomyosin; NEDD9; bacterial invasion; *Listeria monocytogenes*; pathogenesis; actin nucleation.

Abstract

Listeria monocytogenes is an animal and human pathogen that it is able to invade the intracellular space due to the interaction between bacterial surface proteins and host cell receptors, activating signaling cascades that promote pathogen internalization. Gene expression silencing in mammalian cells by transfection of small interfering RNAs (siRNA) has recently allowed the implication of novel molecular effectors to the internalization process of different intracellular pathogens in eukaryotic cells. The present work takes advantage of this technique to determine to potential contribution of tropomyosin (TPM) and the adaptor protein NEDD9 to cell invasion by *L. monocytogenes*, as well as *Salmonella typhimurium* and an *Escherichia coli* strain that expresses the invasins from *Yersinia pseudotuberculosis*. Using gentamicin invasion assays, it is shown that only TPM expression silencing reduces significantly the entry in HeLa cells of the three investigated bacterial pathogens. Fluorescence microscopy demonstrates that TPM and NEDD9 silencing affects differently HeLa cell morphology and the distribution of actin filaments. These results suggest that TPM may modulate the entry of bacterial pathogens by modifying the reorganization properties of the plasma membrane which are dependent on the actin cytoskeleton, and that these properties differ from those affected by NEDD9.

Introducción

L. monocytogenes, un bacilo Gram positivo de amplia distribución en la naturaleza, es el agente etiológico de la listeriosis, una infección de origen alimentario que afecta tanto animales como humanos; esta enfermedad pleiotrópica está caracterizada por distintos cuadros clínicos según la condición inmune del paciente, incluyendo problemas gastrointestinales leves en individuos normales o complicaciones severas como meningitis, sepsis y aborto en pacientes inmuno-comprometidos (Larraín de la C & Carvajal, 2008). Los diferentes cuadros clínicos asociados a la listeriosis están directamente relacionados a la capacidad de *L. monocytogenes* para atravesar diferentes barreras inmunológicas en los huéspedes infectados, y para invadir el espacio intracelular (Doran et al. 2013, Pizarro-Cerdá et al. 2012).

Diferentes factores de virulencia participan en cada etapa del ciclo invasivo de esta bacteria: (i) el locus *inlAB* codifica por las proteínas de superficie InlA e InlB que interactúan con los receptores celulares E-cadherina y c-Met respectivamente para activar cascadas de señalización necesarias a la internalización bacteriana; (ii) la disrupción de la membrana fagosomal y el escape de *L. monocytogenes* al citoplasma esta mediado por la toxina formadora de poros listeriolisina O (codificada por el gen *hly*) y las fosfolipasas PlcA y PlcB; (iii) la proteína de superficie ActA participa en la polimerización de la actina celular para generar una estructura denominada 'cometa de actina' que provee la fuerza motriz que permite a la bacteria desplazarse en el citoplasma de las células infectadas y dispersarse a células adyacentes. Los genes *hly*, *plcA*, *plcB* y *actA* se encuentran en el locus principal de virulencia que codifica igualmente por PrfA, un activador transcripcional de los principales factores de virulencia bacterianos; la transcripción de PrfA es termoregulada, por lo que su máxima expresión se da a 37°C, temperatura que concuerda con la de los organismos hospederos de *L. monocytogenes* (Cossart 2011).

Diversos estudios han permitido determinar las principales cascadas de señalización activadas por InlA e InlB que conducen a la internalización de *L. monocytogenes* en células hospedero: modificaciones post-traduccionales de los receptores E-cadherina y c-Met (Bonazzi et al. 2008, Veiga et al. 2005) permiten reclutar una plataforma molecular asociada a la clatrina (Veiga et al. 2007, Bonazzi et al. 2011),

favoreciendo la modificación de la membrana celular alrededor de *L. monocytogenes* durante su internalización gracias a la polimerización de la actina (Bierne et al. 2001). A pesar de que se han descrito múltiples factores celulares que regulan positivamente (Ireton et al. 1999, Bierne et al. 2005, Pizarro-Cerda et al. 2007) o negativamente (Kühbacher et al. 2012) los rearrreglos del citoesqueleto durante el proceso de captación de la bacteria, muchas funciones y mecanismos de acción del infectoma humano continúan siendo estudiados. El uso de sistemas biológicos basados en la inactivación de grupos de genes utilizando el silenciamiento con ARNs pequeños de interferencia (siARN), ha abierto nuevas vías para el análisis global de las cascadas de señalización del hospedero en el contexto de funciones celulares específicas, incluyendo fagocitosis e internalización de patógenos (Pizarro-Cerda et al, 2012). La presente investigación aprovecha el uso de esta técnica para investigar la posible contribución de las proteínas tropomiosina (TPM) y NEDD9 a la invasión celular por parte de *L. monocytogenes*, estudiando además el impacto de la inactivación de la expresión de estas proteínas en el citoesqueleto de actina.

Materiales y Métodos

Líneas celulares y bacterias

Se utilizó la línea celular HeLa ATCC CCL2 cultivada en medio de crecimiento DMEM suplementado con 10% de FBS y Glutamax (Invitrogen) en ausencia de antibióticos. *L. monocytogenes* cepa EGD.PrfA* (BUG3057) fue cultivada en medio BHI (Gibco); *S. typhimurium* y *E. coli* + invasina fueron cultivadas en medio LB (Gibco).

Transfección de siARNs

Se utilizaron conjuntos de 4 siARNs de tipo 'Smartpool' (Dharmacon) dirigidos contra TPM y NEDD9, así como una secuencia control de siARN aleatorio que no está dirigida contra ningún gen de mamífero. Se mezclaron 200 nM del siARN de interés y 0.2 µl del agente de transfección Lipofectamina ARNiMAX en medio DMEM + Glutamax sin suero y se mantuvo durante 1h a temperatura ambiente para permitir la formación del complejo siARN-Lipofectamina; seguidamente, se realizó una suspensión de células HeLa, de forma que se cultivó en cada pozo (placas de 96 o 24 pozos) $5,4 \times 10^4$

células/ml en medio de crecimiento con un 10% de solución de transfección y se incubaron a 37°C en una atmósfera humidificada al 10% con CO₂ durante 72 horas para permitir la transfección. Para verificar la eficiencia de cada inactivación, se obtuvieron lisados celulares digiriendo en una solución Laemmli 2X células control así como células inactivadas para TPM o NEDD9: estos lisados se sonicaron durante 3 segundos a una amplitud de 20% y las proteínas se migraron en un gel de poliacrilamida al 12% durante 15 minutos a 77V y 60 min a 120V, utilizando el marcador de peso molecular All Blue (BioRad). Se realizó una transferencia semi-seca a membrana PVDF durante una hora a 32mA y seguidamente se realizó el marcaje con anticuerpos primarios por 12 horas a 4°C utilizando un anticuerpo anti-TPM de conejo o un anticuerpo anti-NEDD9 de ratón (se utilizó un marcaje de histonas como control de la cantidad de lisado celular). Después de tres lavados de 5 min con leche 5%, se incubó la membrana con anticuerpos secundarios anti-ratón o anti-conejo acoplados a la HRP durante 2 horas a temperatura ambiente. El marcaje se reveló con el método de película utilizando la solución Super Signal West Dura Extended Duration Substrate (Thermo Scientific).

Ensayos de invasión

El medio de cultivo de células HeLa transfectadas con siARNS en placas de 96 pozos (5 pozos por tratamiento, 5 repeticiones por ensayo) se reemplazó con 100 µl de una suspensión bacteriana de *L. monocytogenes* EGDe PrfA*, *E. coli* + invasina de *Yersinia pseudotuberculosis* o *Salmonella typhimurium* a una concentración de 2x10⁶ células/ml en medio DMEM al 1% de FBS sin antibióticos. Se incubó durante 1 hora a 37°C y en una atmósfera humidificada al 10% con CO₂. Para estimar la cantidad de bacterias inoculadas, se efectuó un conteo en placa, realizando diluciones de 10⁻¹, 10⁻² y 10⁻³ del inóculo y cultivando en placas de agar BHI, agar LB+Cloranfenicol (30µg/ml) y medio LB respectivamente (Kühbacher 2013, Kühbacher *et al.* 2013, 2014). A continuación, se removió el medio de *L. monocytogenes* de cada pocillo y se agregó 100 µl de medio DMEM suplementado con 10% de FBS y 50 µg/ml de gentamicina para eliminar las bacterias extracelulares. Se incubó la placa durante 1h a 37°C en una atmósfera humidificada al 10% con CO₂. Posteriormente, se lavaron las células de cada pozo una vez con 100 µl de medio de crecimiento para

eliminar el antibiótico y se agregaron 100µl de agua destilada para lisar las células. En una nueva placa de 96 pozos se prepararon diluciones del lisado de 10⁻¹, 10⁻² y 10⁻³; 10µl de cada dilución se colocó en placas de agar respectivo y se incubaron a 37°C durante la noche, para permitir el crecimiento de unidades formadoras de colonias (CFUs). Dividiendo el número de CFUs entre el número de bacterias inoculadas se obtuvo el porcentaje promedio de invasión, y se realizó un análisis estadístico con la prueba de t-Student para determinar la significancia de los resultados.

Microscopia de fluorescencia

Con el fin de determinar el efecto de la inactivación de TPM y NEDD9 sobre la organización de citoesqueleto de actina, se procedió a silenciar la expresión de estas proteínas en células HeLa cultivadas en cubre-objetos de 12 mm de diámetro; células inactivadas y células control se fijaron y se permeabilizaron con una solución de formaldehído al 4% por 15 minutos y medio de permeabilización (PBS + BSA al 1% + 0,1% Tritón X100) por 4 minutos, respectivamente, en un volumen final de 200 µl. Posteriormente, se efectuó el marcaje de la actina con faloidina Alexa-546 (1:200) diluida en PBS+1%BSA mediante incubación en una cámara húmeda durante 30 minutos. Los cubre-objetos se fijaron utilizando la resina Fluoromount-G y las muestras se analizaron utilizando un microscopio invertido de tipo 'wide-field' con luz blanca y con fluorescencia roja (546 nm).

Resultados

La eficiencia de la inactivación de TPM y NEDD9 en células HeLa se corroboró mediante transferencia a membrana de vinilideno, resultando en la eliminación de una banda cercana a 37 kDa en el caso de TPM (Figura 1A) y una banda entre 100 y 150 kDa en el caso de NEDD9 (Figura 2A). El resultado de la reducción en la expresión de TPM se asocia a una reducción del 61% (±31) en el porcentaje de invasión de *L. monocytogenes* EGDe.PrfA* respecto al inóculo (Figura 1B). Para investigar si este resultado es específico a la cascada de señalización InIb-Met utilizada por *L. monocytogenes* en células HeLa, se estudió en paralelo el efecto de la inactivación de TPM en la entrada de otros dos patógenos intracelulares: *Escherichia coli* expresando la invasina de

Yersinia pseudotuberculosis, y *Salmonella typhimurium*; como se puede observar en la Figura 1B, la inactivación de TPM también reduce en forma significativa (59% ±26 y 41% ±29, respectivamente) la entrada de estas dos bacterias en células HeLa. En contraste, la inactivación de la proteína adaptadora NEDD9 conduce solo a una leve reducción, no significativa, de la entrada de los tres patógenos intracelulares estudiados: 22% ±13 en el caso de *L. monocytogenes* EGDc PrfA*, 13% ±16 en caso de *E. coli* + invasina y 29% ±19 en el caso de *S. typhimurium* (Figura 2B).

Para comprender el mecanismo molecular responsable de la reducción en la entrada de patógenos durante la inactivación principalmente de TPM, se estudió el impacto de esta inactivación en la distribución del citoesqueleto de actina, un componente crítico durante el proceso de invasión celular por patógenos bacterianos. La inactivación de TPM conduce a una modificación drástica en el número, estructura y direccionalidad de las fibras de estrés de actina con respecto a células control: mientras que en células control estas fibras están ampliamente distribuidas en el citoplasma, son alargadas y siguen globalmente una misma dirección, en células carentes de TPM hay una disminución importante en la densidad de fibras de estrés, y en aquellas

fibras que permanecen se observa una menor longitud y menor organización espacial; en forma consecuente, la morfología de células carentes de TPM es más poligonal. La inactivación de NEDD9 conlleva igualmente a la aparición de células poligonales, pero la densidad de fibras de estrés es mayor que en células carentes de TPM, aunque la organización de las mismas parece alterada (Figura 3).

Discusión

En este trabajo se comparó la infección de células HeLa por parte de *L. monocytogenes*, con la invasión del enteropatógeno *S. typhimurium* y con la entrada de una cepa de *E. coli* que expresa la invasina de *Y. pseudotuberculosis*. Tanto *L. monocytogenes* como *E. coli* + invasina utilizan receptores de membrana en células HeLa (α -Met y β 1-integrina, respectivamente) para activar cascadas de señalización que conducen a un cambio local del citoesqueleto de actina, permitiendo la entrada de estas bacterias en las células hospedero (Cossart & Sansonetti, 2004; Pizarro-Cerda & Cossart, 2006). *S. typhimurium*, por el contrario, utiliza un sistema de secreción de tipo III que permite a la bacteria inyectar proteínas efectoras en el citoplasma de la célula huésped,

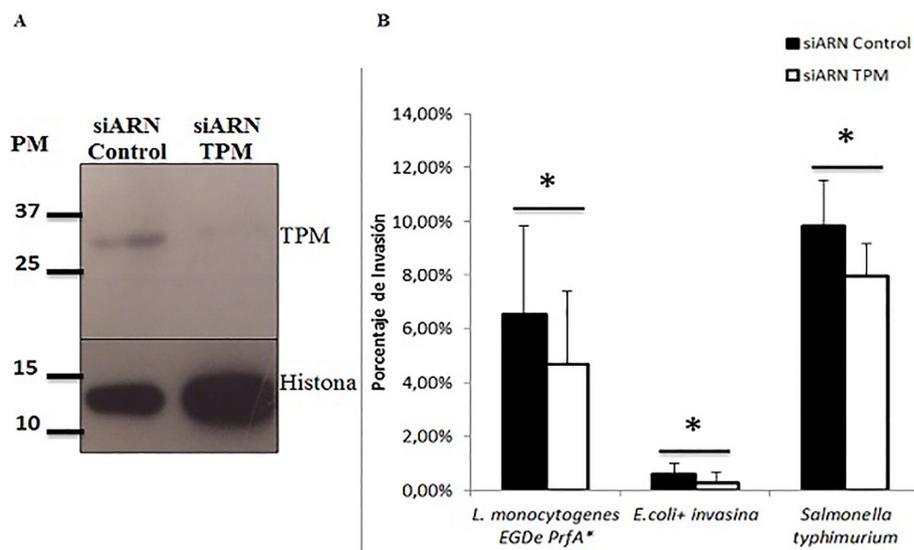


Figura 1. Comportamiento de la invasión bacteriana en células HeLa inactivadas para TPM. A. Resultado de la transfección de siARN TPM y siARN control en la expresión de la proteína TPM. B. Porcentajes de invasión de las bacterias *L. monocytogenes* EGDc PrfA*, *E. coli* + invasina y *S. typhimurium* en células control y células con inactivación de TPM. Prueba de t-Student: *p<0,05.

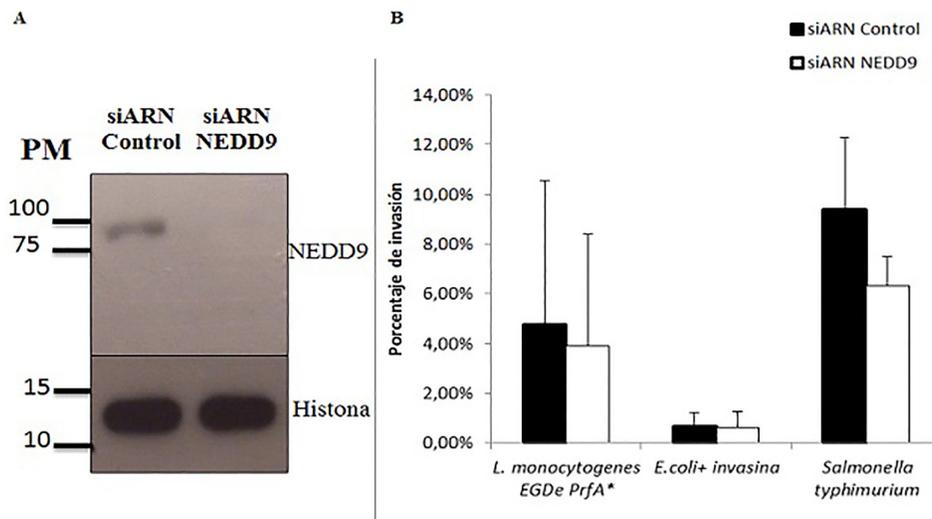


Figura 2. Comportamiento de la invasión bacteriana en células HeLa inactivadas para NEDD9. A. Resultado de la transfección de siARN NEDD9 y siARN control en la expresión de la proteína NEDD9. B. Porcentajes de invasión de las bacterias *L. monocytogenes* EGDe PrfA*, *E. coli* + invasina y *S. typhimurium* en células control y células con inactivación de NEDD9.

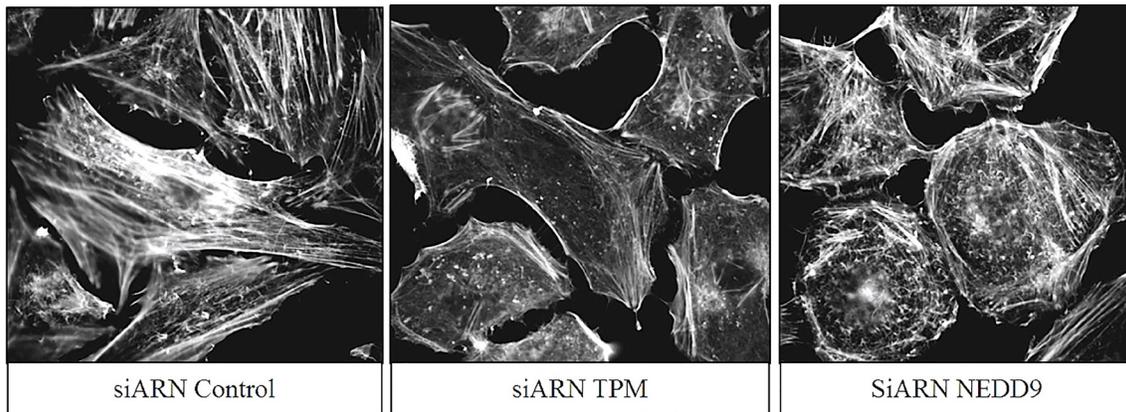


Figura 3. Immunofluorescencia de actina celular marcada con faloidina en células HeLa sin inactivación de proteínas (siARN Control), células inactivadas para la proteína TPM (siARN TPM) y células con inactivación de la proteína NEDD9 (siARN NEDD9). Imagen tomada con objetivo 100X.

manipulando rutas de señalización desde el interior de la célula que conducen a rearrreglos masivos del citoesqueleto de actina que también conducen a la internalización del patógeno (Pizarro-Cerda & Cossart, 2006).

Nuestro trabajo muestra que la inactivación de TPM mediante la técnica de transfección de siARNs disminuye en forma significativa la entrada tanto de *L. monocytogenes* como de *S. typhimurium* y de *E. coli* + invasina en células HeLa (Figuras 1). Como se ha mencionado anteriormente, estas tres bacterias

invasivas, a pesar de activar cascadas de señalización distintas, coinciden en una manipulación molecular del citoesqueleto de actina para lograr modificar la membrana plasmática y favorecer su internalización en células huésped. Los resultados expuestos anteriormente sugieren que la inactivación de TPM modifica una cascada global de señalización común a estos tres patógenos, probablemente ligada al control del citoesqueleto de actina. En efecto, TPM es una proteína citoplasmática de 32 kDa, de la cual existen cinco isoformas que regulan, estabili-

zan y reorganizan los filamentos de actina (Kubo *et al.*, 2012). El análisis de la morfología celular y la distribución del citoesqueleto de actina en células carentes de TPM indican que la inactivación de esta proteína conduce a la aparición de células con morfología más poligonal en comparación con las células control, en las cuales las fibras de estrés prácticamente desaparecen o presentan una importante desorganización vectorial (Figura 3); dentro de este contexto, es posible sugerir como hipótesis que estos cambios estructurales en células HeLa podrían estar asociados a un defecto mayor en la capacidad de rearrreglos de la membrana plasmática que impide la internalización de patógenos tan distintos como *L. monocytogenes*, *S. typhimurium* o *E. coli* + invasina.

Los resultados obtenidos con la proteína NEDD9 indican que esta hipótesis requiere un análisis más detallado. NEDD9 es una proteína de 93 kDa ubicada tanto en el núcleo como en el citoplasma celular, y se considera como una molécula reguladora de la migración celular y de la dinámica de las adhesiones focales en asociación a las integrinas (Aquino *et al.* 2009, Zhong *et al.*, 2012). La inactivación de NEDD9 provoca, al igual que en el caso de la inactivación de TPM, cambios importantes en la morfología celular y en la distribución de filamentos de actina (Figura 3). La carencia de NEDD9, sin embargo, no afecta en forma significativa la entrada de los tres patógenos bacterianos utilizados en este trabajo, a pesar de que se observa una leve reducción en la entrada de *L. monocytogenes* y *S. typhimurium* en células HeLa inactivadas comparadas con células control (Figura 2). Un examen detallado del citoesqueleto de actina en células carentes de TPM y NEDD9 sugiere que la densidad de fibras de estrés es menos importante durante la inactivación de TPM (Figura 3), lo que podría estar directamente asociado a la disminución en la invasión celular, pero una cuantificación objetiva de la distribución y densidad de estas estructuras con el uso de programas de análisis de imágenes como ImageJ o Icy (de Chaumont *et al.* 2012, Schneider *et al.* 2012) es necesario para poder establecer conclusiones definitivas.

Mientras que NEDD9 modifica la distribución de los filamentos de actina en forma indirecta, TPM tiene la capacidad de regular directamente la organización de estas estructuras. El uso de técnicas bioquímicas como la inmuno-precipitación o técnicas microscó-

picas como el análisis de distribución y colocalización de proteínas citoplasmáticas, permitirá identificar los efectores moleculares activados en las cascadas de señalización manipuladas por *L. monocytogenes*, *S. typhimurium* y *E. coli* + invasina que podrían interactuar directamente con TPM durante los procesos de rearrreglo de la actina celular, favoreciendo la comprensión de la contribución de esta molécula al proceso de invasión bacteriana y modificación de las propiedades estructurales de la membrana celular.

Bibliografía

- Aquino, J., Lallemand, F., Marmigère, F., Adameyco, I., Golemis, E. & Ernfors, P. 2009. *The retinoic acid inducible Cas-family signaling protein Nedd9 regulates neural crest cell migration by modulating adhesion and actin dynamics. Neuroscience.* 162 (4): 1106-1119.
- Bierne, H., Gouin, E., Roux, P., Caroni, P., Yin, H. L. & Cossart, P. 2001. *A role for cofilin and LIM kinase in Listeria-induced phagocytosis. Journal Cell Biology.* 155: 101-112.
- Bierne H., Miki H., Innocenti M, Scita G, Gertler FB, Takenawa T, Cossart P. 2005. *WASP-related proteins, Abi1 and Ena/VASP are required for Listeria invasion induced by the Met receptor. Journal of Cell Science* 118(P7): 1537-1547.
- Bonazzi M, Vasudevan L, Mallet A, Sachse M, Sartori A, Prevost MC, Roberts A, Taner SB, Wilbur JD, Brodsky FM, Cossart P. 2011. *Clathrin phosphorylation is required for actin recruitment at sites of bacterial adhesion and internalization. Journal of Cell Biology* 195(3): 525-536.
- Bonazzi, M., Veiga, E., Pizarro-Cerdá, J. & Cossart, P. 2008. *Successive post-translational modifications of E-cadherin are required for InlA-mediated internalization of Listeria monocytogenes. Cellular Microbiology* 10(11): 2208-2222.
- Cossart, P. 2011. *Illuminating the landscape of host-pathogen interactions with the bacterium Listeria monocytogenes. Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108(49): 19484-19491.
- Cossart, P., & Sansonetti, P.J. 2004. *Bacterial invasion: the paradigms of enteroinvasive pathogens. Science* 304 (5668) 242-248.
- de Chaumont F, Dallongeville S, Chenouard N, Hervé N, Pop S, Provoost T, Meas-Yedid V, Pankajakshan P, Lecomte T, Le Montagner Y, Lagache T, Dufour A, Olivo-Marin JC. 2012. *Icy: an open bioimage informatics platform for extended reproducible research. Nature Methods* 9(7): 690-696.
- Doran, K.S., Banerjee A., Disson, O., & Lecuit, M. 2013. *Concepts and mechanisms: crossing host barriers. Cold Spring Harbor Laboratory Press.* 3(7): a010090.
- Ireton, K., Payrastra, B., & Cossart, P. 1999. *The Listeria monocytogenes protein InlB is an agonist of mammalian phosphoinositide 3-kinase. Journal of Biological Chemistry* 274(24): 17025-17032.

- Kubo, E., Hasanova, N., Fatma, N., Sasaki, K. & Singh, D. 2012. Elevated tropomyosin expression is associated with epithelial-mesenchymal transition of lens epithelial cells. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*. 17(1):212-221.
- Kühbacher, A. 2013. Identification of new molecular effectors involved in the internalization of the bacterial pathogen *Listeria monocytogenes* in target cells using high throughput RNAi screening and targeted approaches. Tesis Doctoral (sin publicar). Universidad de París, Francia. Instituto Pasteur. 336p.
- Kühbacher, A., Cossart, P. & Pizarro-Cerdá, J. 2013. Imaging late infection steps by the bacterial pathogen *Listeria monocytogenes*. *Journal of Visual Experiments* 73: In Press.
- Kühbacher, A., Cossart, P., & Pizarro-Cerdá, J. 2014. Internalization assays for *Listeria monocytogenes*. *Methods in Molecular Biology* 1157: 8-14.
- Kühbacher A., Dambournet D., Echard A., Cossart P, Pizarro-Cerdá J. 2012. Phosphatidylinositol 5-phosphate oculocerebrorenal syndrome of Lowe protein (OCRL) controls actin dynamics during early steps of *Listeria monocytogenes* infection. *Journal of Biological Chemistry* 287(16): 13128-13136.
- Larraín de la C, D. & Carvajal, J. 2008. Aspectos fisiopatológicos y moleculares involucrados en el traspaso de *Listeria monocytogenes* a través de la barrera placentaria. *Boletín Escuela de Medicina Universidad Católica de Chile*. 33 (1):20-30.
- Pizarro-Cerdá, J., & Cossart, P. 2006. Bacterial adhesion and entry into host cells. *Cell* 124(4): 715-727.
- Pizarro-Cerdá, J., Kühbacher, A. & Cossart, P. 2012. Entry of *Listeria monocytogenes* in mammalian epithelial cells: An updated view. Cold Spring Harbor Laboratory Press. 2 (11): a010009.
- Pizarro-Cerdá J, Payrastra B, Wang YJ, Veiga E, Yin HL, Cossart P. 2007. Type II phosphatidylinositol 4-kinases promote *Listeria monocytogenes* entry into target cells. *Cellular Microbiology* 9(10): 2381-2390.
- Schneider, C.A., Rasband, W.S. & Eliceiri, K.W. 2012. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9(7): 671-675.
- Vázquez-Boland, J., Kuhn, M., Berche, P., Chak, T., Domínguez-Bernal, G., Goebel, W., González-Zo, B., Wehland, J. & Kreft, J. 2001. *Listeria* pathogenesis and molecular virulence determinants. *Clinical Microbiology Reviews*. 14 (3): 584-640.
- Veiga, E. & Cossart, P. 2005. *Listeria* hijacks the clathrin-dependent endocytic machinery to invade mammalian cells. *Nature Cell Biology* 7(9): 894-900.
- Veiga E, Guttman JA, Bonazzi M, Boucrot E, Toledo-Arana A, Lin AE, Enninga J, Pizarro-Cerdá J, Finlay BB, Kirchhausen T, Cossart P. 2007. Invasive and adherent bacterial pathogens co-opt host clathrin for infection. *Cell Host & Microbe* 2(5): 340-51.
- Zhong, J., Baquiran, J., Bonakdar, N., Lees, J., Wooi, Y., Pugacheva, E., Fabry, B. & O'Neill, G. 2012. NEDD9 stabilizes focal adhesions, increases binding to the extra-cellular-matrix and differentially effects 2D versus 3D cell migration. *PLoS ONE*. 7(4):1-10.

Efecto de la calidad espectral sobre el desarrollo vegetal de *Salvia splendens* variedad Vista Red and White

Effect of spectral quality on plant development of *Salvia splendens* variety Vista Red and White

Federico José Gómez-Coto¹

*Fecha de recepción: 3 de febrero del 2014
Fecha de aprobación: 11 de agosto del 2014*

Gómez, F. Efecto de la calidad espectral sobre el desarrollo vegetal de *Salvia splendens* variedad Vista Red and White. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 49-54.

¹ Estudiante de Ingeniería en Agronegocios, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 8530 2288. Correo electrónico: feder1009@gmail.com.

Palabras clave

Calidad espectral; fuente lumínica; longitud de onda; Salvia; Scarlet Sage.

Resumen

Tres diferentes calidades de luz fueron analizadas sobre una especie ornamental de importancia económica y comercial: *Salvia splendens* ó *Scarlet Sage* (variedad Vista Red & White de PanAmerican Seeds©), mediante la utilización de tres distintas fuentes de luz artificial (azul tipo LED, púrpura tipo LED y fluorescente) para modificar el ambiente de crecimiento de cada una de ellas. La investigación abarcó el análisis de la duración de días a floración, la altura, el diámetro, número de brotes y valores SPAD. Estudios existentes acerca del efecto de la calidad espectral sobre el desarrollo vegetal demuestran que hay alteraciones significativas en variables fotomorfogénicas y de crecimiento vegetal. Por ejemplo en el peso seco de la planta, altura, longitud entrenudos, número de brotes, duración del periodo de floración, número de estomas por planta y cantidad de almidones y azúcares reductores. Sin embargo, en el estudio realizado se encontró que la calidad espectral proporcionada con luz suplementaria sólo tiene efecto en los días a floración, comparado con el tratamiento testigo, puesto que reduce en una semana la floración, pero, no hay diferencia entre los tres diferentes tratamientos con luz suplementaria. La demás variables analizadas (número de brotes, altura, diámetro promedio y valores SPAD) no tienen un efecto significativo por la calidad espectral utilizada ($p > 0.05$). El estudio fue realizado en el invernadero académico del Tecnológico de Monterrey, ubicado en Monterrey, Nuevo León, México; durante el periodo de Agosto-Diciembre, 2013.

Keywords

Spectral quality; light source; wavelength; Salvia; Scarlet Sage.

Abstract

Three different qualities of light were analyzed on ornamental specie of economic and commercial importance: *Salvia splendens* or *Scarlet Sage* (variety Red & White of PanAmerican Seeds©), using three different sources of artificial light (blue-LED, purple-LED and fluorescent) to modify the growth environment of each one. The investigation covered analysis of days to flowering, height, diameter, number of buds and SPAD values. Existing studies on the effect of spectral quality on plant growth show that exist significant alterations on variables in photomorphogenic and plant development. For example: the dry weight of the plant, height, internode length, number of buds, flowering duration, number of stomata per plant and amount of reducing sugars and starches. However, in this study it was found that the spectral quality provided with supplementary light only has effect in days to flowering compared with control treatment, because reduce in one week the flowering days, but, has not effect between supplementary lighting treatments. Others variables studied (buds number, height, diameter and values SPAD) had not significant effect by quality spectral used ($p > 0.05$). The study was made in the academic greenhouse ITESM, located in Monterrey, Nuevo Leon, Mexico, during the period of August to December 2013.

Introducción

La planta ornamental *Salvia splendens* pertenece a la categoría de *beddings plants*, las cuales son de gran importancia en la economía norteamericana y europea. En países como Estados Unidos, por ejemplo, esta categoría de ornamentales representa ventas de más de 1300 millones de dólares anuales (USDA, National Agricultural Statistics Service, 2013). Siendo una especie de alta importancia comercial, el estudio de efectos sobre su desarrollo vegetal adquiere importancia en términos de mejoramiento en la producción de las mismas. La variedad estudiada, vista red and white, tiene un denso crecimiento de sus espigas florales, follaje verde oscuro con crecimiento continuo, sin decoloración por la luz solar, buena tolerancia al calor, precoz y de costumbre (PanAmerican Seed, 2013).

La aplicación de diferentes fuentes de luz con distinta longitud de onda es una técnica para analizar algunas características en el desarrollo vegetal. De acuerdo con Gil (1995), Sinha (2004) y Hopkins (1995) las longitudes que producen sensación de luz se hallan entre los 390 y los 760 nm y los pigmentos fotosintéticos absorben sólo esta porción visible del espectro. Además, cualquier fuente de energía radiante que incluya longitudes de onda dentro del espectro visible inducirá fotosíntesis siempre y cuando tenga suficiente intensidad (Meyer & Anderson, 1952). Las zonas de absorción máxima se encuentran en la región de onda corta y larga del espectro visible. En el centro se hallan los valores de longitud de onda que corresponden al color verde que, prácticamente, no se absorbe y de ahí la coloración verde que exhiben los vegetales (Gil, 1995).

Las luces tipo LED (*Light Emitting Diode*) son utilizadas actualmente porque ofrecen una especificidad en la longitud de onda y un calentamiento mínimo

y han sido de gran utilidad en estudios previos con *beddings plants* (Heo, Lee, Chakrabarty, & Paek, 2002; Heo, Lee, & Paek, 2006). En el caso de la luz azul (LA), la longitud de onda emitida tiene un rango entre 425 y 490 nm (Hopkins, 1995) y la luz púrpura (LP), al ser una combinación de azul y rojo emite rangos de 425 a 490 nm, correspondiente al color azul, y de 640 a 700 nm que corresponden al color rojo (Hopkins, 1995). Por otra parte, la luz fluorescente ha sido la fuente de luz artificial más común en las investigaciones con plantas superiores, sin embargo, este tipo de luz ofrece únicamente un amplio espectro de radiación para las plantas (Heo *et al*, 2002).

La clorofila, al ser el principal pigmento fotosintético en los vegetales, va a estar afectada por la calidad espectral percibida. De acuerdo con Gil (1995), Sinha (2004) y Hopkins (1995) la clorofila a posee máximos de absorción entre 430 y 440 nm y luego a 600 nm; por su parte la clorofila b entre los 450 y 460 nm y luego entre 640 y 650 nm. Por esta razón, se consideró realizar un análisis no destructivo del contenido clorofílico bajo los distintos tratamientos mediante el dispositivo SPAD-502. Dicho dispositivo fue desarrollado por la compañía japonesa Minolta Camera© y da lecturas en unidades denominadas SPAD por sus siglas en inglés (*Soil-Plant Analyses Development*). Este dispositivo portátil, ligero, con auto-calibración y no destructivo registra mediciones de densidad óptica en dos distintas longitudes de onda, las cuales convierte en señales digitales y posteriormente en valores SPAD (Rodríguez & Miller, 2000). Varios autores como Cerovic, Masdoumier, Ben Ghazlen, & Latouche (2012); Rodríguez & Miller (2000); Mielke, Schaffer, & Li (2010); Ling, Huang, & Jarvis (2011) y Uddling, Geland-Alfredsson, Piiki, & Pleijel (2007) reportan

Cuadro 1. Integral de luz diaria y temperatura promedio recibida de todos los tratamientos durante 36 días.

Factor	LF1*	LP*	LA*	T*
Luminosidad ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	19.84	20.77	19.87	22.49
Temperatura día (°C)	30.37	30.25	30.13	29.91
Temperatura noche (°C)	22.26	22.19	22.25	21.99

*Los cálculos se hicieron basado en los datos de los datalogger Hobo tipo Pendant© de Onset Technologies©

que efectivamente existe una relación entre el valor SPAD y el contenido de clorofila, tanto de clorofila a como clorofila b. Sin embargo, estos valores pueden ser afectados por el cultivar, estado de crecimiento de las plantas, factores edáficos y climáticos que puedan causar clorosis en las hojas, grosor de la hoja, succulencia foliar, masa foliar específica (Marenco, Antezana-Vera, & Nascimento, 2009), hora del día en la que se hace la medición y el nivel hídrico de la planta (Martínez & Guiamet, 2004).

El objetivo del estudio es analizar el efecto de diferentes calidades de luz sobre el desarrollo vegetal de las plantas mediante el estudio de cambios significativos entre los tiempos a floración, número de brotes, altura, diámetro promedio y valores SPAD.

Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló en el invernadero académico del Departamento de Agrobiotecnología del Tecnológico de Monterrey, México, localizado a una altitud de 540 msnm, 25° 38' 48" N y 100° 17' 1" O. Se evaluó el efecto de la calidad espectral de distintas fuentes lumínicas durante el desarrollo de la planta en estudio. Se conformaron tres ambientes de desarrollo mediante el uso de mini-túneles donde la fuente de emisión de luz artificial modificó el ambiente de crecimiento y un ambiente sin túnel como testigo. Los mini-túneles fueron construidos con tubería PVC hidráulica de ¾" cedula 40, conformando una estructura de tres arcos de 2 x 2.5 x 1.6 m (L;A;A). Las fuentes lumínicas de 125 W de luz fluorescente (LFI) de Hydrofarm® para el ambiente 1, de 32 W de luz azul (LA) de LedKesill® para el ambiente 2 y de 32 W de luz púrpura (LP) de LedKesill® para el ambiente 3; se instalaron sobre un riel de desplazamiento continuo montado en los mini-túneles y dispuesto a 80 cm sobre los materiales en estudio. Se utilizó una especie de paisajismo ornamental denominada Salvia (*Salvia splendens*). La variedad específica utilizada fue Vista Red & White de Panamerican Seeds®. Se establecieron un total de 40 plantas distribuidas en lotes de 10 plantas cada una con un ambiente distinto (luz fluorescente-LFI, luz azul-LA, luz púrpura-LP y testigo-T). Se utilizó una mezcla de sustratos compuestos de dos partes de perlita por una parte de Peat Moss®. En la solución nutritiva se utilizó 144 ppm de Nitrógeno (N), 120 ppm de Fosforo (K), 100 ppm de Potasio (P),

50 ppm de Azufre (S) y 80 ppm de Magnesio (Mg). Se utilizó el sistema Xilema® para el riego automatizado, proporcionando 70% de solución nutritiva y 30% agua, balanceando además el pH en forma constante a un nivel de 6,1.

El sensor utilizado para el monitoreo de las condiciones ambiente fue el data loggers Hobo tipo Pendant® de Onset Technologies®, el cual permitió el monitoreo oportuno en *in situ* del ambiente físico existente durante el desarrollo de los cultivos (temperatura y luminosidad). Se utilizó el sensor SPAD-502Plus® de Konica Minolta® para registrar los valores SPAD medidos de forma aleatoria en las hojas de las plantas.

La recopilación de información se realizó a lo largo de 5 semanas en el caso de las lecturas SPAD. Los demás datos fueron recolectados a los 36 días posteriores al trasplante. Se realizó análisis de varianza (ANOVA) y agrupación por el método de Tukey con la finalidad de determinar diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

Resultados y discusión

Dado que las diferentes fuentes de luz varían en calidad e intensidad y que cada cultivo tiene un rango óptimo en el que se maximiza la fotosíntesis (Torres & Lopez, 2004), se calculó la luz diaria integrada, DLI por sus siglas en inglés, para cada tratamiento (luz fluorescente-LFI, luz púrpura-LP, luz azul-LA y tratamiento testigo-T).

Tiempo a floración

La luz, a través de la fotosíntesis, influye en el crecimiento de las plantas así como en otros procesos de desarrollo vegetal como la germinación y la floración (Runkle & Blanchard, 2013). En este estudio, se observó que LFI y LP lograron una floración más temprana respecto a LA y T. Sin embargo, una semana más tarde el tratamiento LA alcanzó a los otros tratamientos con fuentes lumínicas artificiales. El tratamiento T mantuvo su nivel de floración en esa semana. La *Salvia splendens* al ser una especie que presenta una respuesta fotoperiódica facultativa (Runkle & Blanchard, 2013) presentó una floración más rápida en los tratamientos que involucran luz artificial que el tratamiento testigo. No obstante, entre los tres tratamientos con luz artificial hubo una mínima diferencia en la floración a los 22 días

(figura 1) pero, a los 30 días ya se encontraban todos casi al mismo nivel de floración.

Número de brotes, altura y diámetro promedio

De acuerdo con el análisis estadístico realizado, no hay diferencia significativa entre el número de brotes, altura y diámetro de la *Salvia splendens* bajo los cuatro distintos tratamientos aplicados. Algunas investigaciones (Heo *et al*, 2002; Heo *et al*, 2006) han demostrado que existen efectos significativos de la calidad espectral sobre el crecimiento y la fotomorfogénesis en variables como: peso seco, altura, longitud entrenudos, número de brotes, duración del periodo de floración, número de estomas por planta y cantidad de almidones y azúcares reductores; en cultivares como: Salvia, Marigold y Ageratum. Sin embargo, con la metodología y dispositivos usados en este experimento, no efectos significativos.

Valores SPAD

De acuerdo con el análisis estadístico, no existe diferencia significativa en ninguno de los diferentes tratamientos en cuanto a los valores SPAD obtenidos semanalmente con el SPAD-502. Estudios anteriores (Ling *et al*, 2011; Cerovic *et al*, 2012; Uddling *et al*, 2007) han establecido relaciones lineales y no lineales entre el valor SPAD y el contenido de clorofila. Por lo tanto, la calidad espectral, en este caso, no influyó en la cantidad de clorofila en los distintos tratamientos y por ende no afectó la capacidad de absorción de luz para el proceso de fotosíntesis.

Conclusión

Los tratamientos con luz artificial utilizados (LFI, LA, LP) aceleran los días a floración de 22 a 30 días en comparación con el tratamiento testigo. Sin embargo, entre los tratamientos LFI, LA y LP no hay nin-

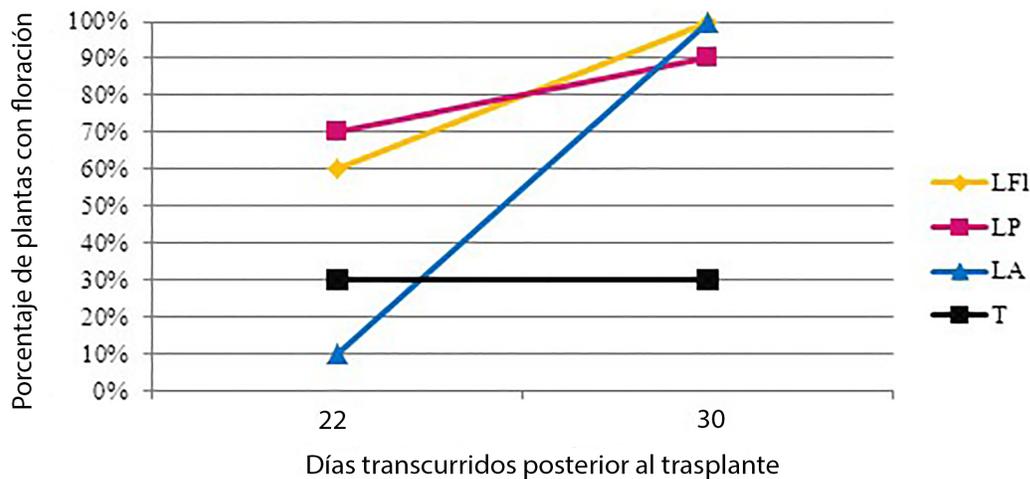


Figura 1. Porcentaje de plantas en floración a los 22 y 30 días.

Cuadro 2. Resultados de número de brotes, altura y diámetro en los distintos tratamientos (luz fluorescente-LFI, luz azul-LA, luz púrpura-LP y testigo-T).

Variable	LFI	LP	LA	T
Brotes (u)*	4.30±0.95 (a)	3.60±0.70 (a)	4.40±1.17 (a)	3.90±1.37 (a)
Altura (cm)*	32.90±3.32 (a)	34.40±1.78 (a)	34.50±1.51 (a)	35.10±2.96 (a)
Diámetro(cm)*	28.25±3.06 (a)	28.25±3.26 (a)	28.95±3.26 (a)	27.75±5.28 (a)

Los valores que comparten una letra no son significativamente diferentes. *Valor de p>0.05

Cuadro 3. Valores SPAD a lo largo de 5 semanas en los distintos tratamientos (luz fluorescente-FLI, luz azul-LA, luz púrpura-LP y testigo-T)

Semana	LFI	LP	LA	T
Semana 1*	44.59±4.27(a)	44.35±5.36(a)	45.33±3.16(a)	42.85±4.51(a)
Semana 2*	43.98±5.20(a)	43.70±2.99(a)	46.09±4.52(a)	40.96±6.44(a)
Semana 3*	44.97±5.76(a)	46.62±2.52(a)	45.03±4.88(a)	40.59±5.44(a)
Semana 4*	46.80±5.21(a)	49.12±2.98(a)	46.64±1.86(a)	46.92±2.88(a)
Semana 5*	49.36±5.48(a)	49.48±4.85(a)	45.54±8.01(a)	50.29±3.97(a)

Los valores que comparten una letra no son significativamente diferentes. *Valor de $p > 0.05$

guna diferencia. Por otra parte, la calidad espectral utilizada no tiene ningún efecto sobre el número de brotes, altura, diámetro y valores SPAD en la *Salvia splendens* var. Vista Red and White.

Bibliografía

- Cerovic, Z., Masdoumier, G., Ben Ghazlen, N., & Latouche, G. (2012). A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. *Physiologia Plantarum*, 146, 251-260.
- Gil, F. (1995). *Elementos de Fisiología Vegetal*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Heo, J.W., Lee, C.W., & Paek, K.Y. (2006). Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *Journal of plant biology*, 49(4), 286-290.
- Heo, J., Lee, C., Chakrabarty, D., & Paek, K. (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation*, 38, 225-230.
- Hopkins, W. (1995). *Introduction to plant physiology*. New York: John Wiley & Sons.
- Ling, Q., Huang, W., & Jarvis, P. (2011). Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynth Res*, 209-214.
- Marenco, R., Antezana-Vera, S., & Nascimento, H. (2009). Relationship between specific leaf area, leaf thickness, leaf water content and SPAD-502 readings in six Amazonian tree species. *PHOTOSYNTHETICA*, 47(2), 184-190.
- Martinez, D., & Guiamet, J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24, 41-46.
- Meyer, B., & Anderson, D. (1952). *Plant physiology*. New York: D. Van Nostrand Company.
- Mielke, M., Schaffer, B., & Li, C. (2010). Use of a SPAD meter to estimate chlorophyll content in *Eugenia uniflora* L. leaves as affected by contrasting light environments and soil flooding. *PHOTOSYNTHETICA*, 48(3), 332-338.
- PanAmerican Seed. (2013). *PanAmerican Seed*. Recuperado el 2 de 11 de 2013, de Vista red and white Salvia: http://www.panamseed.com/plant_info.aspx?phid=054901621004575&dispmode=
- Rodriguez, I., & Miller, G. (2000). Using a Chlorophyll Meter to Determine the Chlorophyll Concentration, Nitrogen Concentration, and Visual Quality of Augustinegrass. *HortScience*, 33(5), 751-754.
- Runkle, E., & Blanchard, M. (17 de Abril de 2013). *Greenhouse Energy Conservation Strategies: Lighting*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2013, de Use of lighting to accelerate crop timing: http://www.hrt.msu.edu/energy/Notebook/pdf/Sec1/Runkle%20and%20Blanchard,%20Use_of_Lighting.pdf
- Sinha, R. (2004). *Modern Plant Physiology*. India: Alpha Science International Ltd.
- Torres, A., & Lopez, R. (2004). *Floriculture Purdue University*. Recuperado el 14 de 11 de 2013, de Medición de luz diaria integrada en invernaderos: <http://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-SW.pdf>
- Uddling, J., Geland-Alfredsson, J., Piiki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynth Res*, 37-46.
- USDA, National Agricultural Statistics Service. (Abril de 2013). *Floriculture crops*. Recuperado el 2 de 11 de 2013, de Summary 2012: <http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/FlorCrop/FlorCrop-04-25-2013.pdf>

Muestreo comprimido en red inalámbrica de sensores para monitorización de vibración en puentes

Compressed Sensing in Vibration Monitoring
Wireless Sensor Network

Oswaldo Casares-Quirós¹

*Fecha de recepción: 2 de mayo del 2014
Fecha de aprobación: 7 de setiembre del 2014*

Casares-Quirós, O. Muestreo comprimido en red inalámbrica de sensores para monitorización de vibración en puentes. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 55-63.

¹ Asistente eBridge. Instituto Tecnológico de Costa Rica, eScience, eBridge. Costa Rica. Estudiante de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 86486203. Correo electrónico: osvaldocasares@gmail.com.

Palabras clave

Codificador Condicional; Decodificador Predictivo; Monitorización de Vibración en Puentes; Muestreo Comprimido; Redes Inalámbricas de Sensores, Submuestreo; Waspnote.

Resumen

Un 70% de los puentes de Costa Rica presentan elementos críticos en la estructura. Las redes inalámbricas de sensores han sido utilizadas para la monitorización de estructuras debido al bajo tiempo de instalación y costo económico ya que el sistema no requiere alambrado.

En este documento se presenta una red inalámbrica de sensores capaz de ejecutar algoritmos de muestreo comprimido para medir la vibración en puentes. El diseño de la red se plantea buscando integridad en los datos y un reducido consumo energético.

El algoritmo realiza submuestreo mediante pares codificador-decodificador en el protocolo de comunicación. El par seleccionado es codificador condicional y decodificador predictivo. Esta combinación presenta elementos en común que se pueden compartir para obtener mejores estimaciones en pocos pasos.

Se presentan dos variantes del par codificador-decodificador: variable-fijo y fijo-variable. El primer caso propone una compresión de factor constante durante cada período de muestreo mientras que el segundo una compresión variable en función del comportamiento de la señal en el tiempo.

Tras una prueba experimental con Waspnotes se obtuvo que la variante fijo-variable presenta una reducción del 56.58% de consumo de potencia introduciendo un error máximo de $\pm 0.00195g$ y una compresión del 52.44% de muestras. Con ello la red aumentó su autonomía energética de 17 horas a 26 horas y media. Mediante un análisis matemático la técnica variable-fijo presenta una reducción a lo sumo de 74.81% de consumo de potencia en transmisiones de los nodos sensores y compresión de un 90% de muestras como máximo.

Keywords

Bridge Vibration Monitoring; Compressed Sensing; Conditional Coder; Downsampling; Predictive Decoder; Waspnote; Wireless Sensor Networks.

Abstract

Over 70% of the bridges in Costa Rica have critical elements in the structure. Wireless sensor networks have been used for structural monitoring because of their short installation time and low economic cost due to the lack of wiring.

In this research is presented a wireless sensor network which uses a compressed sensing algorithm for vibration monitoring on bridges. The network design is proposed expecting data integrity and energy harvesting.

The algorithm performs downsampling by coder-decoder pairs. The selected pair is conditional encoder and predictive decoder because this combination has elements in common that can shared to get better estimates in few steps.

Two coder-decoder pairs variants are presented: variable-fixed and fixed-variable. The first one proposes a constant factor compression during each sampling period while the second presents variable compression that depends of the signal behavior over time.

After an experimental test using Waspnotes the fixed-variable variant has a 56.58% reduction of power consumption by introducing a maximum error $\pm 0.00195g$ and compress in 52.44% the amount of samples. This algorithm increased the network energy autonomy from 17 hours to 26.5 hours. Through mathematical analysis, the variable-fixed technique reduces in 74.81% the power consumption in sensing nodes transmissions and decrease in 90% the number of samples.

Introducción

Cerca del 70% de los puentes en Costa Rica presentan elementos críticos en la estructura (MOPT, 2002). Desde el año 2007 se inició la evaluación del estado de los puentes para promover el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes (Agencia de Cooperación Internacional de Japón, 2007). En los últimos 5 años el tema de puentes ha sido un problema grave de interés nacional, incluyendo pérdidas humanas por fallas. Además, durante los años 2012 y 2013 puentes en las principales rutas nacionales han colapsado e impactado de manera negativa el desarrollo del país.

En el año 2011 el Instituto Tecnológico de Costa Rica incursiona con el proyecto de investigación eBridge "Predicción remota de fallas en puentes" que propone un sistema de monitorización de estructuras mezclando inspecciones visuales con redes sensoriales para complementar y revolucionar los análisis estructurales en el país. Una variable considerada por este grupo es la vibración (Ortiz, 2013).

Durante una prueba de carga realizada en 2012, el grupo recolectó datos de vibración durante 24 horas. No obstante, se encontró una limitante en la autonomía energética del sistema ya que se restringía a aproximadamente 17 horas. Por este motivo, las baterías de los nodos sensores tuvieron que ser cargadas durante la prueba para evitar la pérdida de datos (Libelium, 2013; Ortiz, 2013). Ante esta problemática, una reducción del consumo de potencia es necesario para aumentar el tiempo de duración de batería para aprovechar las características inalámbricas del sistema.

Diversos métodos de muestreo comprimido en redes inalámbricas de sensores han sido desarrollados en los últimos 6 años. Estas se basan en algoritmos de muestreo comprimido que son típicamente usados en el área de procesamiento digital de señales con el objetivo de reducir la cantidad de transmisiones en la red inalámbrica, lo que conlleva a una reducción significativa del consumo energético ya que la comunicación en radio frecuencia es crítica en estos sistemas (Barceló, 2012; Libelium, 2013).

Monitorización de vibración mecánica

La vibración mecánica en puentes es una variable que ha tomado mucha importancia en el área de monitorización de estructuras. Su principal objetivo es caracterizar mediante un análisis modal las formas de vibración. Por ejemplo, en los puentes se analizan los procesos relacionados a la estructura con el fin de obtener una descripción matemática del comportamiento dinámico. Tras el análisis se puede obtener la relación:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (2.1)$$

donde M es la matriz $N \times M$ de masa, C es la matriz $N \times N$ de amortiguamiento y K es la matriz de rigidez del material. F es el vector $N \times 1$ de fuerza mientras que x es el vector de desplazamiento. Los puntos sobre x denotan el número de derivaciones con respecto al tiempo. Suponiendo que el vector F está compuesto de señales senoidales como una serie de Fourier, por linealidad, se sabe que x también lo es. Al transformar al dominio de frecuencia se obtiene de forma singular (Hardyniek, 2009):

$$[-\omega^2 M + j\omega C + K]\{x\}e^{j\omega t} = \{f\}e^{j\omega t} \quad (2.2)$$

Para el análisis, las mediciones realizadas en función del tiempo por los sensores son transformadas al dominio de la frecuencia con lo que es posible la obtención de un modelo matemático del comportamiento dinámico del puente utilizando la ecuación (2.2). Ello se obtiene mediante una transformación discreta de Fourier donde típicamente se emplea el algoritmo de la transformada rápida de Fourier.

En este caso, la vibración es una señal dinámica que se presenta en puentes a bajos niveles de frecuencia para la monitorización de vibración ambiental, normalmente las componentes superiores a 25 Hz suelen ser filtradas. No obstante, las primeras armónicas se encuentran entre los 0Hz y los 15Hz (Hardyniek, 2009; Wenzel y Pichler, 2005). Por ello, con base en el teorema de Nyquist una frecuencia de 30Hz es suficiente para poder muestrear la señal.

Red inalámbrica de sensores

una red inalámbrica de sensores es un conjunto de nodos distribuidos en un espacio para medir y monitorizar variables. Dentro de la red, existen dos tipos de nodos: nodo sensor y nodo sumidero. El rol

de nodo sensor se basa en realizar la medición de la variable de interés y llevar a cabo la transmisión de la información mediante algún protocolo de comunicación. El nodo sumidero se encarga de reunir las mediciones de nodos sensores (Tapia, 2006).

En cuanto al nodo sensor, este debe tener cuatro módulos de hardware principales: energía, lógica computacional y de almacenamiento, sensor y comunicación (Garbarino, 2006). El apartado energético es un parámetro muy importante ya que define la autonomía de la red y en muchos casos el tamaño del nodo. Una técnica para obtener ahorro de energía es mediante algoritmos en el protocolo de comunicación (Hu y Cao, 2010).

Entre los estándares empleados en comunicaciones para redes inalámbricas de sensores sobresale el IEEE 802.15.4. Dada la latencia de 15ms y la frecuencia de muestreo de 30Hz este es un factor de interés a la hora de implementar el nodo sumidero. Así mismo, el alcance de 10-20m puede parecer reducido, sin embargo, en Costa Rica un 76% de los puentes no supera los 30m por lo que una topología en estrella satisface las condiciones de recolección de datos de una manera mínima de transmisiones dentro de la red. Para el 24% restante, se puede implementar en topología árbol o distribuida para poder alcanzar la completa medición en el puente (Archundia, 2003; MOPT, 2002).

Muestreo comprimido

el muestreo comprimido es una técnica conocida en el procesamiento digital de señales desde 2006 (Donoho, 2006). Esta establece que una señal poco densa en algún dominio ϕ de m dimensiones, donde m es un número natural puede ser representada mediante una base ortonormal ψ de tal forma que la cantidad de componentes sea óptima. Ello facilita a la compresión de la señal x ya que requiere menos dimensiones sin introducir alto error a la señal (Donoho, 2006). En un sentido matemático se tiene:

$$X \approx \sum_{i=1}^k s_i \psi_i = S \psi$$

donde k es un número natural tal que $k \ll m$.

Las ventajas de aplicar el algoritmo de muestreo comprimido durante el procesamiento digital de señales radica en la reducción de información

necesaria para reconstruir la señal. Esto se traduce en una reducción focalizada en cinco aspectos: frecuencia de muestreo, cantidad de datos, recursos para su almacenamiento, exigencia de velocidad en componentes físicos empleados y uso de ancho de banda para la transmisión de los datos (Fornasier y Rauhut, 2010).

Algoritmos con muestreo comprimido

cabe resaltar que una red inalámbrica de sensores siempre se puede modelar como un arreglo matricial de poca densidad por lo que la aplicación de la técnica se ve favorecida (Xiaoyan, Houjun y Zhijian, 2010). Los fundamentos del muestreo comprimido se aplica a las redes inalámbricas de sensores para mejorar la técnica de adquisición de datos en redes amplias (Haifeng, Zhen y Jianmin, 2012; Zhang, chen y Liu, 2009). Con base en las prácticas de diseño la red debe ser escalable y el tráfico de datos puede aumentar conforme se evoluciona la red (Xue, Donf y Shi, 2013). Con el muestreo comprimido si el número de nodos transmitiendo aumenta, el consumo de potencia de la red aumenta de manera sublineal por lo que ayuda a ahorrar energía especialmente en redes con alta cantidad de nodos (Bajwa, Haupt, Sayeed y Nowak, 2006). Es importante conocer que no todos los nodos pertenecientes a la red deben realizar el algoritmo ya que en algunos casos es contraproducente (Luo, Xiang y Rosenberg, 2010).

Tras la iniciativa de emplear muestreo comprimido en redes inalámbricas de sensores se ha combinado con otras técnicas en el protocolo de comunicación para aumentar su efectividad (Li, Zhang, Wu y Zhou, 2013; Nguyen, Jones y Krishnamurthy, 2010; You, Han y Su, 2013). La clave radica en buscar reducir la cantidad de transmisiones dentro del sistema ya que representan el mayor porcentaje de consumo energético (Balouchestani, 2011; Balouchestani, Raahemifar y Krishnan, 2011). Algunos modelos probabilísticos son utilizados de manera complementaria al algoritmo con el fin de obtener mejores resultados en la reconstrucción de la señal (Liu, Liu y Qiu, 2010; Hu y Yang, 2010; Meng, Li y Han, 2009). La selección de cuáles técnicas emplear tanto para la adquisición de datos como para la reconstrucción de la señal dependen completamente de la naturaleza de la misma. Ello afecta directamente al desempeño del algoritmo en términos de consumo

de potencia y calidad de la señal reconstruida (Yang, Xiao y Zhang, 2013). Así mismo, la topología de red empleada define la forma óptima para la captación de la señal (Haupt, Bajwa, Rabbat y Nowak, 2007).

El fundamento matemático del muestreo comprimido se aplica suponiendo que la señal es la matriz de dimensión $N \times K$ cuyos coeficientes son los valores medidos por cada nodo sensor. Suponiendo que la red es de N sensores, la señal tiene N dimensiones, cada una representada por un sensor. Mediante el algoritmo, se define la cantidad de dimensiones K que se van a medir, donde, por lo que es recomendable para arreglos de alta cantidad de sensores. Las mediciones realizadas se envían a través de comunicación inalámbrica a un nodo sumidero y este se encarga de reconstruir las faltantes $N-K$ dimensiones. Ello ayuda a reducir el consumo de potencia de transmisiones, y como $K \ll N$, las transmisiones se reducen cerca del 90%. No obstante, la lógica en los nodos sensores es más compleja lo que aumenta el consumo de potencia de procesamiento. Pese a ello, la relación de consumo de potencia por procesamiento es casi despreciable en comparación con el consumo por la comunicación inalámbrica (Barceló, 2012).

Submuestreo mediante pares codificador-decodificador

La técnica clásica de submuestreo aplicada a protocolos de comunicación se basa en un par codificador-decodificador que reduce la cantidad de información a transmitir. Las etapas de este método se muestran en la figura 1. El proceso describe cómo, de la señal medida $x(n)$ se obtiene la señal reconstruida $\tilde{x}(n)$ (Barceló, 2012).

Un codificador conocido es el de submuestreo condicional. Este emplea información pasada para identificar patrones en la señal. Se basa en predicciones comparadas con la medición real para determinar si se efectúa la adquisición de la muestra.

El decodificador predictivo es aquel que requiere de información anterior, además de la muestra actual. Los valores no recibidos se completan mediante un valor predicho mediante algún cálculo matemático que se ajuste a la naturaleza de la señal. Típicamente la predicción se realiza mediante estadística basada en promedio y moda, no obstante, también puede ser mediante procesos estocásticos basados en correlación.

El par codificador condicional-decodificador predictivo comparte el uso de predicciones. Para ello, el nodo sensor realiza una etapa de entrenamiento donde se identifica el comportamiento básico en el entorno para realizar estimaciones más acertadas. Se define Δ como el error máximo permitido para una aproximación. Mediante este tipo de submuestreo se proponen los dos algoritmos: Δ fijo-Kvariable y Δ variable-Kfijo.

El método Δ variable-Kfijo se basa en la técnica pura del muestreo comprimido a redes inalámbricas de sensores. Presenta la ventaja que la cantidad de datos recopilados es constante a lo largo del tiempo, es decir, la energía consumida por transmisiones en la red se reduce en un factor de $N-K$. No obstante, presenta el inconveniente de que necesita una retroalimentación del nodo central por lo que en cada proceso de medición el nodo sensor debe recibir información a través de la red inalámbrica.

La técnica Δ fijo-Kvariable suprime el lazo de retroalimentación para que la red inalámbrica sea unidireccional. La limitación que presenta es la incapacidad de determinar cuántos nodos transmitirán la medición en cada ejecución.

Prueba de algoritmos de compresión

Durante una prueba de estudio del grupo de investigación eBridge, se pudo identificar la cantidad de tráfico que viaja a través del puente sobre el río Purires en la ruta 2. En dicha prueba se observó que en promedio transita 1 eje cada 7.5s, es decir, la fre-

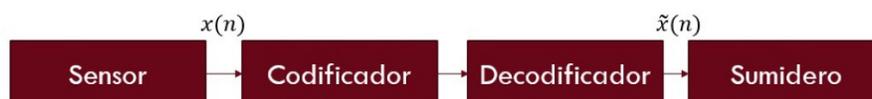


Figura 1. Diagrama de bloques de un protocolo de comunicación basado en codificador-decodificador.

cuencia de actividad promedio es 0,13Hz. Además, con la velocidad y longitud promedio de cada vehículo se aproximó que cada uno excita el puente por aproximadamente 3s. (Ortiz, 2013).

Para evaluar el desempeño del algoritmo Δ fijo-Kvariable la prueba consiste en el nodo sensor sujeto a una superficie donde se aplicaron pulsos con una frecuencia de 0.13Hz y una duración de 3s simulando la actividad en el puente de estudio. Durante el proceso, se midió la aceleración en los 3 ejes de coordenadas cúbicas y el consumo de potencia del nodo sensor; esto con el fin de analizar las dos variables de interés: integridad de datos y consumo de potencia. En cuanto al algoritmo Δ variable-Kfijo se hará un análisis teórico para cumplir la condición de $K \ll N$.

La medición de aceleración se realizó mediante los nodos Wasp mote y el consumo de potencia mediante una unidad de medida de fuente (SMU).

Resultados y análisis

En la figura 2 se muestra el consumo de corriente del nodo sensor sin algoritmo de compresión mientras que la figura 3 presenta el caso con el método Δ fijo-Kvariable.

En la figura 3 se identifica dos partes importantes para el análisis: entrenamiento (1) y ciclo (2). En el cuadro 1 se compara el consumo de corriente durante ambas etapas para el sistema en los dos casos medidos.

El entrenamiento es el aprendizaje para reconocimiento del patrón de medición en la red. Dado el agregado de los cálculos para la etapa de predicción, el consumo es ligeramente mayor cuando se emplea el algoritmo de compresión. No obstante, esta etapa se ejecuta únicamente los primeros 5s por lo que en un análisis global de desempeño es casi despreciable. En contra parte, el ciclo se ejecuta después del entrenamiento hasta que se termine la medición. Note que el consumo es reducido en un 56,58% durante esta etapa, la cual al ejecutarse durante todo del tiempo después de los 5s de estudio, se puede aproximar como el ahorro energético total de la red.

Un modelo Δ fijo-Kvariable presenta algunos casos donde se estaría muestreando sin recibir inclusive una medición en el nodo sumidero, sin embargo, durante una excitación al puente todos los nodos estarán transmitiendo. En contraparte, suponiendo que $N \approx 10K$ el consumo con la técnica Δ variable-Kfijo se puede aproximar como:

Lo que reduce el consumo de potencia en un 74,81% por nodo. Esta reducción se cumple bajo los términos estrictos desde el punto de vista de transmisión de datos. Cabe recordar que la técnica Δ variable-Kfijo requiere de gasto de energía que Δ fijo-Kvariable no sufre en el momento de recepción de datos. En el método variable-fijo no se puede realizar una desconexión del transceptor mientras no se transmite ya que también puede recibir información. La técnica Δ variable-Kfijo es

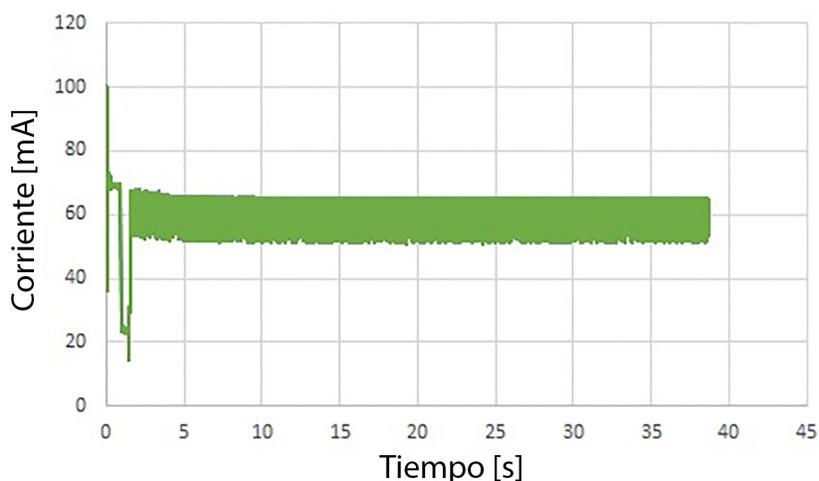


Figura 2. Consumo de corriente del nodo sensor con fuente fija a 3.795V sin algoritmo de compresión.

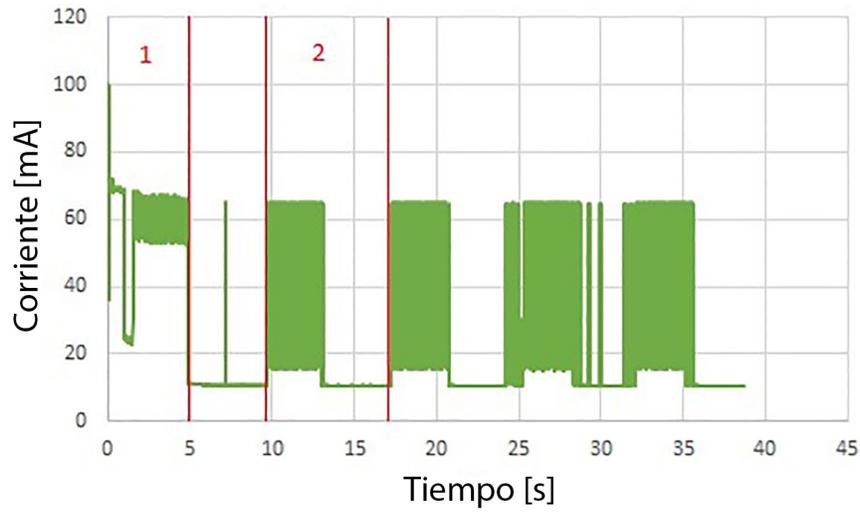


Figura 3. Consumo de corriente del nodo sensor con fuente fija a 3.795V con el método fijo-variable

Cuadro 1. Comparación de consumo de corriente.

Entrenamiento (1)			Ciclo (2)		
Sin compresión [mA]	Δ fijo Kvariable [mA]	Porcentaje [%]	Sin Compresión [mA]	Δ fijo Kvariable [mA]	Porcentaje [%]
60,53	61,39	1,41	63,11	27,40	-56,58

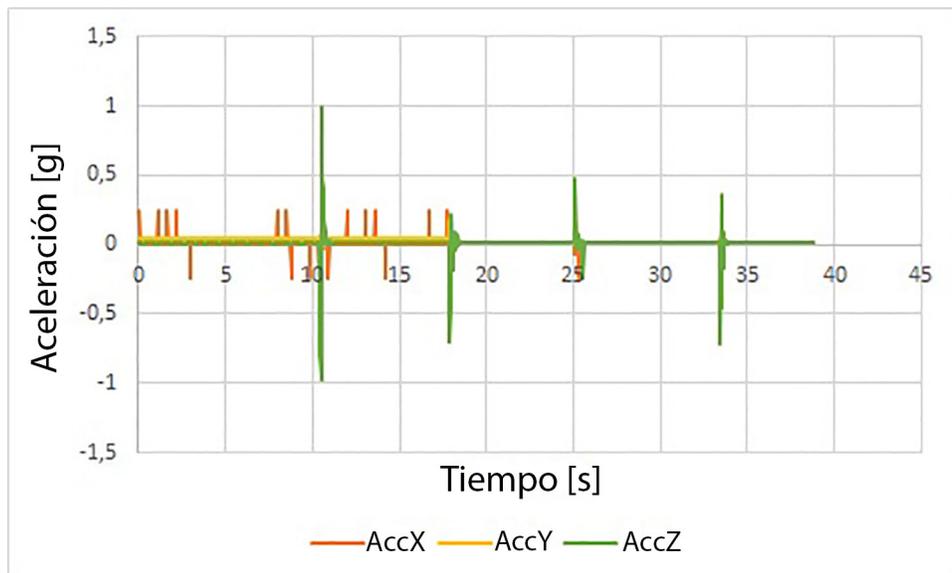


Figura 4. Medición de aceleración sin algoritmo de compresión.

recomendable si se utilizan transceptores donde el consumo de corriente por transmisión es mucho mayor que al de recepción.

Las muestras recopiladas por el nodo sensor sin el algoritmo de muestreo comprimido se presentan en la figura 4, mientras que la señal reconstruida mediante Δ fijo-Kvariable se muestra en la figura 5.

Note que ambas señales son similares, presentan perturbaciones significativas cada 7,5s aproximadamente. No obstante, en la figura 4 se puede observar entre los 0 y 17s que en el eje X también se midió pequeñas perturbaciones con la misma magnitud. Es evidente que estos valores son indicios de ruido en la medición ya que son de misma magnitud y aparecen cuando no se aplicó ningún estímulo al sensor. Este comportamiento es atribuido al gran flujo de datos en la red, el buffer de datos se satura y provoca lecturas incorrectas como en este caso. Esto se puede corregir empleando filtros o algoritmos de corrección de datos. En la figura 5 se observa que este error no existe, sino que se limita a registrar los eventos sucedidos a 0,13Hz ya que el par codificador-decodificador funciona a su vez como un filtro digital.

Con respecto a la cantidad de datos, en promedio al muestrear en un ciclo se manejaron 225 datos, al aplicar el algoritmo Δ fijo-Kvariable se reduce a 118 y con la técnica variable-fijo a 22,5. La reducción de

datos alcanza el 52,44% y el 90% respectivamente para cada método.

En cuanto a la integridad de los datos, en las partes dinámicas el error introducido por el algoritmo Δ fijo-Kvariable es cero ya que ante perturbaciones se muestrea a la tasa máxima definida por la transmisión. No obstante, en período de reposo, el algoritmo introduce un margen de error de $\pm 0,00195g$, lo cual es inclusive menor que el inducido por el sensor ($\pm 0,002g$). En el caso con Δ variable-fijo el error es variable pero presente y diferente en $N-K$ muestras en cada período.

Conclusiones

Los pares codificador condicional-decodificador predictivo en redes inalámbricas de sensores son usados como herramienta de submuestreo para disminuir el costo energético en redes inalámbricas de sensores en términos de transmisión de datos. Además, el uso de predicciones favorece que el error inducido por el algoritmo sea reducido.

La naturaleza de la señal a medir determina la efectividad de diferentes variaciones de la técnica. Para el caso de monitorización de vibración en puentes, la señal dinámica requiere una tasa de muestreo como mínimo de 30 Hz. Además, el comportamiento en función del tiempo se debe analizar para conocer el

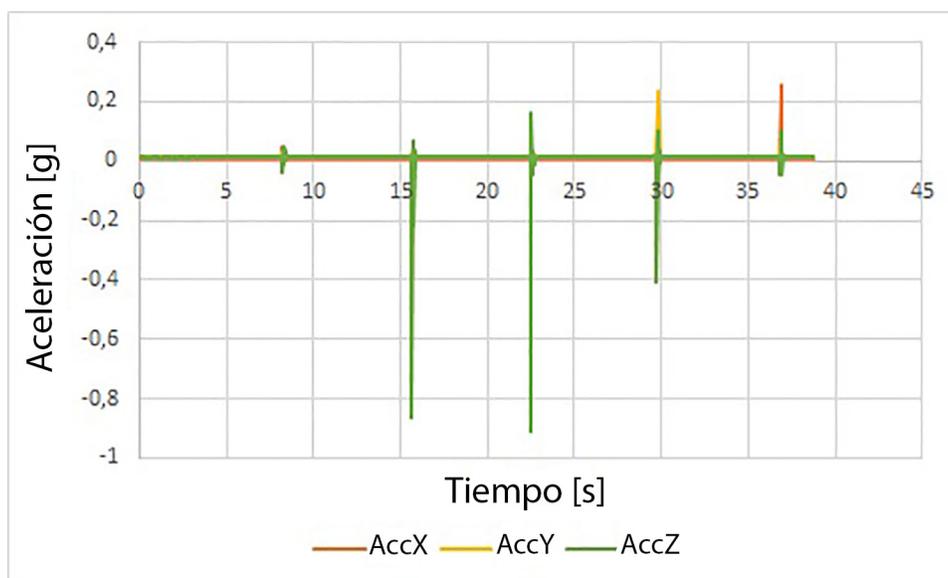


Figura 5. Medición de aceleración con método defijo-variable.

momento conveniente para llevar a cabo la etapa de estudio.

La variante Δ fijo-Kvariable presenta una reducción del 56,58% de consumo de potencia. La técnica Δ variable-Kfijo presenta una reducción a lo sumo de 74,81% de consumo de potencia en transmisiones de los nodos sensores, no obstante, es significativo el consumo de potencia por recepción de datos.

En el caso Δ fijo-Kvariable la cantidad de datos se reduce en un 52,4% induciendo un error máximo de $\pm 0,00195g$ mientras que Δ variable-Kfijo comprime hasta un 90% con un error variable.

Referencias

- Agencia de cooperación internacional de Japón. (Febrero 2007). El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica. Reporte técnico, MOPT.
- Archundia, F. (2003). Wireless personal area network (wpan) and home networking. Tesis de maestría, Universidad de las Américas Puebla.
- Bajwa, Haupt, Sayeed y Nowak. (2006). Compressive wireless sensing. IPSN'06.
- Balouchestani, B. (2011) Low-power wireless sensor network with compressed sensing theory. IEEE.
- Balouchestani, Raahemifar, y Krishnan. (2011). Increasing the reliability of wireless sensor network with a new testing approach based on compressed sensing theory. IEEE.
- Barceló, J. (2012). Communications in Wireless Sensor Networks: Compression, Energy Efficiency and Secrecy. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Donoho, D. (2006). Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, 52(4).
- Fornasier y Rauhut. (2010). Compressive sensing.
- Garbarino, J. (2006). Protocolos para redes inalámbricas de sensores. Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires, Noviembre 2011.
- Haifeng, Zhen y Jianmin. (2012). Wavelet transform-based distributed compressed sensing in wireless sensor network.
- Hardyniek, A. (2009). Dynamic testing and modeling of a super-elevated skewed highway bridge. Tesis de maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Haupt, Bajwa, Rabbat y Nowak. (2007) Compressed sensing for networked data.
- Hu y Cao. (2010). Wireless Sensor Networks. CRC Press.
- Hu y Yang. (2010). Spatial correlation-based distributed compressed sensing in wireless sensor networks. IEEE.
- Li, Zhang, Wu y Zhou. (2013) Efficient data gathering with network coding coupled compressed sensing for wireless sensing networks. Information Technology Journal, 12(9).
- Libelium. (Setiembre 2013). Waspote Technical Guide, 4.6 edition.
- Liu, Liu, y Qiu. (2010). A new adaptive compressed sensing algorithm for wireless sensor networks. IEEE ICSP.
- Luo, Xiang y Rosenberg. (2010). Does compressed sensing improve the throughput of wireless sensor networks?
- Meng, Li, y Han. (2009). Sparse event detection in wireless sensor networks using compressive sensing.
- MOPT. (2002). El sistema de puentes del ministerio de obras públicas y transportes (MOPT) [online]. Obtenido desde <http://www.mopt.go.cr/planificacion/carreteras/puentes.asp>.
- Nguyen, Jones y Krishnamurthy. (2010) Netcompress: Coupling network coding and compressed sensing for efficient data communications in wireless sensor networks. IEEE SIPS.
- Ortiz, G. (2013). eBridge "Predicción remota de fallas en puentes". Documento i - informe técnico de los resultados del proyecto. Reporte técnico, ITCR.
- Tapia, J. (2006). Tutorial de redes de sensores ad hoc con eficiencia en energía. Tesis de maestría, Universidad de las Américas Puebla.
- Wenzel y Pichler. (2005). Ambient Vibration Monitoring. Wiley.
- Xiaoyan, Houjun and Zhijian. (2010). Wireless sensor networks based on compressed sensing. IEEE.
- Xue, Dong y Shi. (2013). Multiple access and data reconstruction in wireless sensor networks based on compressed sensing. IEEE Transactions on Wireless Communications, 12(7).
- Yang, Xiao, y Zhang. (2013). Data aggregation scheme based on compressed sensing in wireless sensor network. Journal of Networks, 8(1).
- You, Han, y Su. (2013). Cross-layer optimization algorithm for cognitive wireless visual sensor networks with distributed compressed sensing. Journal of Convergence Information Technology, 8(2).
- Zhang, Chen y Liu. (2009). The application of compressed sensing in wireless sensor network. IEEE.

Desarrollo de una metodología de optimización y fijación de precios de exportación de Madera Dura de Estados Unidos a Europa y Asia

Development of a methodology of optimization and fixing prices of Hardwood Exports from U.S. to Europe and Asia

Diana Brenes-Ramírez¹

Fecha de recepción: 22 de mayo del 2014

Fecha de aprobación: 6 de setiembre del 2014

Brenes-Ramírez, D. Desarrollo de una metodología de optimización y fijación de precios de exportación de Madera Dura de Estados Unidos a Europa y Asia. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 64-69

¹ Estudiante de Ingeniería en Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: dmbri24@gmail.com.

Palabras clave

Madera Dura; precios; demanda; gestión; optimización; exportación; gestión de ingresos.

Resumen

Este trabajo consiste en el desarrollo de una metodología de optimización y fijación de precios de exportación de Madera Dura de Estados Unidos a Europa y Asia. El enfoque recalca en generar una metodología que le permita a las empresas establecer los precios de sus productos a partir de bases concretas donde se hayan considerado factores internos y externos, además de cumplir con las expectativas del cliente. La oportunidad de mejora nace después de la crisis del mercado inmobiliario de Europa y Asia del año 2009, específicamente para el año 2013 las exportaciones de madera dura aumentan considerablemente y se considera que es el momento clave para que las empresas aprovechen esta oportunidad y mejoren su rendimiento en exportaciones.

La metodología desarrollada se basa en los principios de "Revenue Management" el cual es una teoría que predice comportamiento del consumidor y busca la optimización de los precios para maximizar los ingresos de la empresa.

El objetivo de maximizar el margen de contribución total de la empresa se logra mediante la aplicación de la teoría PRO (Pricing and Revenue Optimization) la cual proporciona un enfoque coherente y concreto de las decisiones de fijación de precios en toda la organización, además se busca representar el precio como un proceso merecedor de ser mejorado continuamente. Mediante la asociación negativa entre demanda y precio se establece la ecuación que describe esta relación y posteriormente se introduce en la ecuación del margen de contribución total la cual es maximizada para obtener el precio óptimo.

Keywords

Hardwood; prices; demand; management; optimization; exports; revenue management.

Abstract

This work is about the development of a methodology of optimization and fixing prices of Hardwood Exports from U.S. to Europe and Asia. The approach emphasizes on creating a methodology that allows the companies to set prices for their products from concrete bases where this considered internal and external factors , in addition to comply with the customer expectations . The opportunity for this improvement comes after the domestic market crisis in Europe and Asia in 2009, specifically for 2013 when the hardwood exports increased considerably and this is considered like a key for companies improve them performance in exports.

The methodology is based on the principles of "Revenue Management" which is a theory that predicts consumer behavior and seeks to optimize prices to maximize revenue of the company.

The objective of maximizing total contribution margin of the company is achieved by applying the theory PRO (Pricing and Revenue Optimization) which provides a consistent and concrete approach to pricing decisions throughout the organization also seeks represent the price as a process worthy of being continuously improved . By the negative association between price and demand and with the equation that describes this relation it is introduced into the equation of total contribution margin that is maximized for obtain the optimal price.

Introducción

Para el año 2009 la industria de madera dura cayó a niveles históricamente bajos debido a la crisis en el mercado inmobiliario de Estados Unidos y el colapso de la economía. Posteriormente para el año 2012, los mercados internacionales representaron el 17.3% del volumen de producción de madera dura de todo el Este de los Estados Unidos, este porcentaje ha aumentado a través del tiempo donde a partir del año 2010 las exportaciones de madera dura se incrementaron un 10.4% durante los primeros 10 meses del año en relación a los mercados locales. Por lo tanto, la industria de madera dura de los Estados Unidos ha considerado a los mercados internacionales como una oportunidad para reemplazar parte de la demanda local perdida después de la crisis económica del año 2009. Del año 2009 al 2012 el volumen de exportaciones de madera incrementó un 60% donde el 96% de las mismas se concentran en 4 regiones principales: Norte América (Canadá y México), Asia, Unión Europea y Medio Oriente.

La investigación previa ha demostrado que la fijación de precios de venta y una adecuada administración de la demanda son factores claves en el desempeño de las empresas en mercados internacionales. Por lo tanto, con el fin de enfrentar la situación planteada se recurre al estudio de "Revenue Management" el cual se basa en la aplicación de principios de investigación de operaciones para establecer mecanismos

de venta, así como la aplicación de decisiones como estrategia para optimizar la disponibilidad y el precio del producto para maximizar los ingresos.

Mediante este método de toma de decisiones al desarrollar una modelo de fijación de precios que maximice el margen de contribución la empresa puede definir de forma concreta los precios de sus productos a partir de bases sólidas donde se alcance comparar el margen de contribución versus los precios y así optimizar la contribución, cumpliendo a su vez con el cliente final. Es importante destacar que las investigaciones sobre el desempeño de exportaciones de productos de madera son prácticamente inexistentes y este es un enfoque innovador tanto teórico como práctico.

Aplicación de la Teoría de "Revenue Management"

La teoría de "Revenue Management" se define como una herramienta analítica que predice el comportamiento del consumidor y optimiza el precio para maximizar los ingresos de la empresa (Talluri & Van Ryzin, 2005). El principal objetivo de RM es vender el producto adecuado al cliente adecuado, en el momento adecuado, al precio correcto y mediante el canal de distribución correcto siendo esta la esencia de la optimización de precios e ingresos (Phillips, 2005).

Una manera de optimizar los precios a partir de bases concretas es mediante la teoría de Optimización de precios e ingresos PRO (Pricing and Revenue Optimization) se proporciona un enfoque coherente de las decisiones de precios en toda la organización.

En términos cuantitativos, Phillips (2005) establece que para cualquier análisis PRO es importante considerar la función precio-respuesta $d(p)$ la cual especifica como la demanda de un producto varía según el precio, p . Esta afirmación está asociada con el cubo PRO, ya que el precio de un producto cambia de acuerdo a la combinación de las dimensiones. En términos generales, la relación de estas variables (demanda-precio) muestra un comportamiento decreciente, tal y como se observa en la figura 1 donde la demanda de un producto varía como resultados de los cambios en el precio (Arias, 2014).

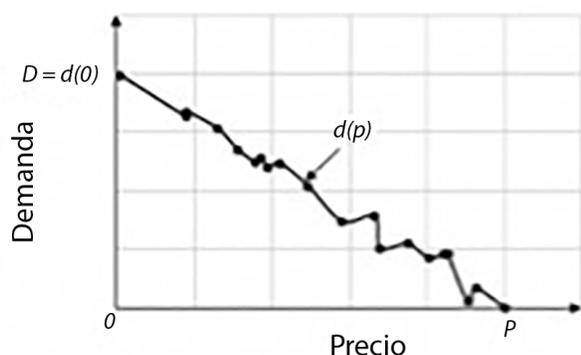


Figura 1. Curva típica de Demanda versus Precio
Fuente: Arias, E. (2014). Pricing optimization and demand management in the U.S. Hardwood Industry. Sustainable Innovation Management. Obtenido de <http://sim.sbio.vt.edu/?p=2045>

El problema básico de optimización de precios y el objetivo de los vendedores es maximizar el margen de contribución total (m) donde cada pedido de un cliente tiene un precio (p) y se incurre en un costo (c) según la ecuación 1 (Phillips, 2005).

$$m(p) = (p-c) d(p) \quad |$$

En general, la función de la contribución total $m(p)$ es cóncava, con un solo vértice situado en el punto donde la primera derivada es igual a cero, tal y como se muestra en la figura 2. Es decir, es el punto donde se maximiza la contribución total y el precio es óptimo (p^*) (Arias, 2014).

Metodología

Para el desarrollo del proyecto en primera instancia se realizó una entrevista con las empresas involucradas a las cuales se les explicó detalladamente el contexto del tema y las posibles soluciones que se alcanzarían. Además en base a la demanda se decidió cuáles productos se analizarían. Posteriormente se procede a estructurar con la empresa los requisitos e información necesaria de manera que se establecieran las relaciones entre demanda y precio de los productos escogidos.

Una vez terminada la etapa de recolección de datos se procede a almacenar los datos de la manera más eficiente, es decir de forma que la empresa pueda ingresar fácilmente a la información y además que la misma esté disponible para los análisis correspondientes.

Posteriormente se procede a analizar los datos recolectados y almacenados donde se toma la información de la demanda de cada producto y se grafica contra los precios, donde se obtiene la relación lineal de estas variables. Posteriormente se procede a maximizar la ecuación del margen de contribución y se obtiene el precio "óptimo" el cual es evaluado contra los precios actuales de la empresa y se determina el margen de contribución obtenido a partir del modelo actual de la empresa y el modelo propuesto para finalmente escoger el modelo que genere el mayor margen de contribución., lo cual se determina como la prueba del modelo propuesto de optimización y fijación de precios de exportación.

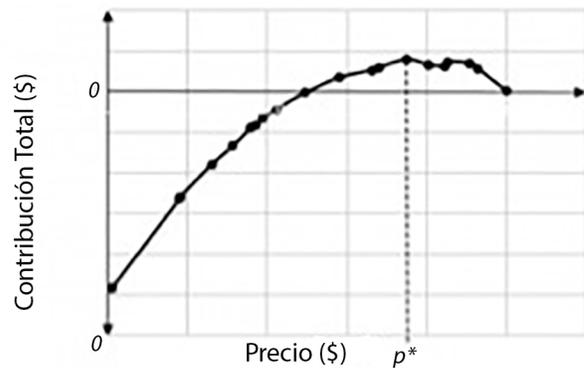


Figura 2. Contribución total en función del precio

Fuente: Arias, E. (2014). Pricing optimization and demand management in the U.S. Hardwood Industry. Sustainable Innovation Management. Obtenido de <http://sim.sbio.vt.edu/?p=2045>

Resultados, análisis y discusión

En base a la información suministrada por las empresas se tiene que estas no cuentan con un modelo concreto de fijación de precios, es decir las empresas no tienen un proceso definido de fijación de precios. Según las declaraciones de los empresarios ellos mantienen monitoreados los precios de la industria de madera dura en general con el fin de tener un panorama acerca del comportamiento de los precios.

Además las empresas se basan en la importancia de los clientes y sus volúmenes de compras para establecer los precios de venta, es decir las empresas involucradas no cuentan con un modelo específico de fijación de precios.

Analizando el comportamiento de la demanda versus los precios se detectan dos productos de las empresas que cumplen con la asociación negativa requerida por el modelo PRO, donde además de analizar esta asociación se examina el coeficiente de correlación el cual determina una correlación negativa fuerte y significancia del valor del coeficiente de correlación. Este resultado conlleva a proceder con la maximización de la ecuación del margen de contribución donde se obtiene el precio óptimo.

Posteriormente a partir del precio obtenido para cada uno de los productos se calcula el margen de contribución a partir de la diferencia entre el

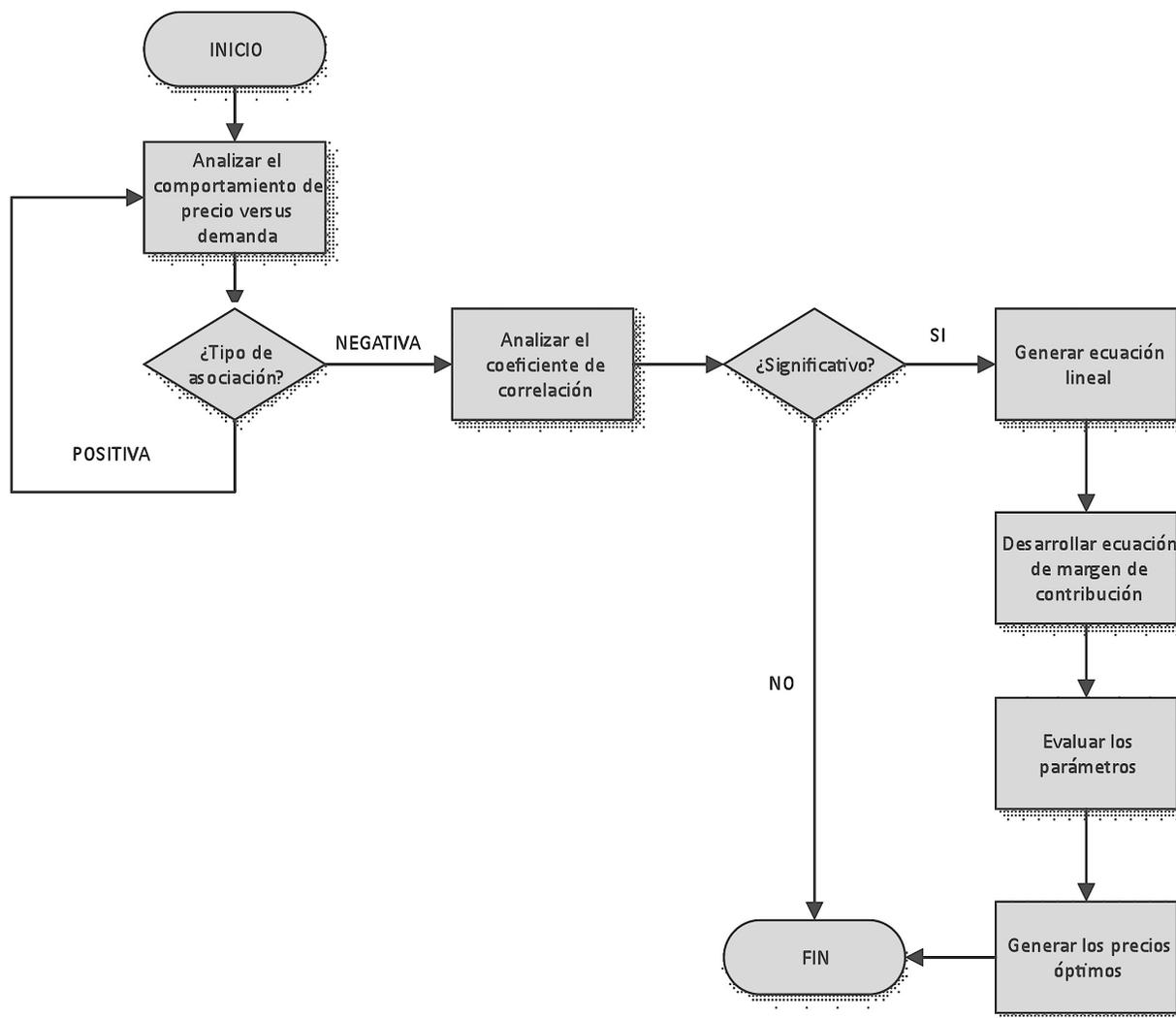


Figura 3. Proceso de implementación del modelo de optimización y fijación de precios

precio y costo del producto, procedimiento que se realiza también a partir de los precios establecidos por la empresa. De esta manera se logra comparar si el modelo de optimización y fijación de precios es favorable para incrementar los beneficios de la empresa.

De la prueba anterior se tiene que para el caso se la empresa A y para los tres meses analizados se tiene un incremento en los ingresos o margen de contribución del 9%, 42% y 177% respectivamente, donde analizando los precios se concluye que estos si están dentro de los rangos de precios que maneja la empresa pero incrementar sus beneficios y se afirma que efectivamente el modelo de optimización y fijación de precios es mejor que el método actual utilizado por la empresa.

Para el caso de la empresa B y para los meses analizados se obtiene que el método actual utilizado por la empresa es más favorable que el modelo propuesto de optimización y fijación de precios, ya que a partir del método actual la empresa genera mayores ingresos. No obstante para esta empresa es importante que se examine este proceso y se implementen mejoras dentro de su proceso.

El proceso del modelo de optimización y fijación de precios propuesto se detalla en la figura 3.

Discusión y Conclusiones

Para el caso de la empresa A se propone que considere implementar el modelo de optimización y fijación de precios basado en los principios de

“Revenue Management” donde gracias a este modelo se visualiza que los ingresos serán aumentados considerablemente.

En el caso de la empresa B se propone que continúe con el método actual para el producto estudiando, sin embargo no se descarta la posibilidad de que el modelo sea probado para otros productos o bien se analice si los precios establecidos por la empresa son razonables dentro del mercado, lo cual corresponde a otro estudio.

Por otro lado e igualmente para ambas empresas se afirma que la organización debe de establecer, implementar y mantener un método de optimización y fijación de precios, lo cual evite que los precios sean establecidos arbitrariamente y por el contrario sean fundamentados.

El compromiso de la organización es un factor predominante, ya que es importante que la alta gerencia así como los encargados del departamento de ventas proporcione la información necesaria para desarrollar los análisis pertinentes.

La vigencia del modelo de optimización y fijación de precios dependen en gran medida del compromiso de los encargados, el correcto almacenamiento y análisis de los datos.

Referencias

- Arias, E. (2012). *Exports of U.S. Hardwood Products: Increasing Performance in Asia and Western Europe*. Blacksburg, Estados Unidos: Virginia Polytechnic Institute and State University .
- Arias, E. (28 de Enero de 2014). *Pricing optimization and demand management in the U.S. Hardwood Industry*. Obtenido de Sustainable Innovation Management: <http://sim.sbio.vt.edu/?p=2045>
- Devore, J. (2008). *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias*. México, D.F.: Cengage Learning Editores S.A.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Phillips, R. (2005). *Pricing and revenue optimization*. Stanford, California: Stanford University Press
- Talluri, K., & Van Ryzin, G. (2005). *The theory and practice of revenue management*. Estados Unidos: Springer Science Business Media.